



Kalle Syrjäläinen

Liittymien viivytysmallien kehittäminen hankearviointiin soveltuviksi

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 19.12.2014

Valvoja: Professori Tapio Luttinen

Ohjaajat: DI Jukka Ristikartano, DI Terhi Svenns

Tekijä Kalle Syrjäläinen

Työn nimi Liittymien viivytysmallien kehittäminen hankearviointiin soveltuviksi

Koulutusohjelma Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

Pääaine Liikenne- ja tietekniikka

Professuurikoodi Yhd-71

Työn valvoja Professori Tapio Luttinen

Työn ohjaajat DI Jukka Ristikartano, DI Terhi Svenns

Päivämäärä 19.12.2014

Sivumäärä 53 + 54

Kieli suomi

Tiivistelmä

Tässä työssä on kehitetty liittymien viivytysmallit hankearviointiin soveltuviksi. Mallit on kehitetty käytettäväksi Liikenneviraston Investointihankkeiden vaikutusten arviointiohjelmiston (IVAR) versiossa 3.0.

Viivytysmallit on laadittu Paramics-mikrosimulointiohjelmistolla simuloitujen kokonaisviivytysten perusteella. Simuloinneissa liittymien saapumissuuntia tarkasteltiin erillisinä, jolloin mallit voitiin luoda erikseen liittymän pää- ja sivusuunnille. Matemaattiset mallit muodostettiin SPSS Statistics -ohjelmalla lineaarista regressioanalyysia käyttäen. Mallit on laadittu tuntiliikenteiden pohjalta siten, että ne ovat muunnettavissa vuositasolle tuntijärjestyskäyrien avulla.

Tarkastellut liittymätyypit kattavat sekä taso- että eritasoliittymät. Tasoliittymistä on tarkasteltu kanavoimatonta (ei omia kaistoja tulosuuntien eri liikennevirroille), kanavoitua (pääsuunnassa vasemmalle kääntyville omat kaistat) kolmi- ja nelihaaraista liittymää, sekä kolmi- ja nelihaaraista kiertoliittymää. Lisäksi on tarkasteltu porrastettua liittymää sekä kolmea eritasoliittymää. Eritasoliittymätyypeinä ovat yksiramppinen eritasoliittymä sekä eritasoliittymät silmukka- ja rombisilla rampeilla. Kanavoitujen liittymien ohjaustapoina on tarkasteltu väistämisvelvollisuutta, pysähtymispakkoa ja valo-ohjausta.

Avainsanat viivytysmalli, liikenteen simulointi, hankearviointi, regressioanalyysi



Author Kalle Syrjäläinen		
Title of thesis Development of Intersection Delay Models for Project Evaluation		
Degree programme Transportation and Environmental Engineering		
Major Transportation and Highway Engineering	Code of professorship	Yhd-71
Thesis supervisor Professor Tapio Luttinen		
Thesis advisors M.Sc. (Tech.) Jukka Ristikartano, M.Sc. (Tech.) Terhi Svenns		
Date 19.12.2014	Number of pages 53 + 54	Language Finnish

Abstract

In this study intersection delay models have been developed for project evaluation. Models have been developed for the use of version 3.0 of The Finnish Transport Agency's Investment Project Impact Assessment Software (IVAR).

Delay models are based on total delays obtained by Paramics microscopic traffic simulation software. In the simulations, intersection approaches were investigated separately in order to create separate models for major and minor approaches. Mathematical models were formulated with SPSS Statistics software using linear regression. Models have been developed using hourly traffic volumes and thus can be converted to annual level using annual traffic pattern curves.

Investigated intersection types cover at-grade intersections and interchanges. At-grade intersections include unchannelized (no separate lanes for different traffic flows), channelized (left-turn lanes on major approaches), three- and four-way intersections, plus three- and four-way roundabouts. In addition, an offset intersection and three interchanges were investigated. Interchanges include a single-ramp interchange, a partial cloverleaf interchange and a diamond interchange. Give way control, two-way stop control and traffic signals were examined as control methods on channelized intersection.

Keywords delay model, traffic simulation, project evaluation, regression analysis

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Liikenneviraston tilaamana konsulttitoimeksiantona Ramboll Finland Oy:ssä. Työn tavoitteena oli kehittää uudet liittymien viivytysmallit tiehankkeiden yhteiskuntataloudellisten vaikutusten arvioinnissa käytettävään Investointihankkeiden vaikutusten arviointiohjelmistoon (IVAR). Työtä ovat rahoittaneet Liikennevirasto sekä Ramboll Finland Oy.

Kiitän työn mahdollistamisesta sekä Liikennevirastoa että Rambollia, etenkin työtä ohjanneita Jukka Ristikartanoa ja Terhi Svennsiä. Kiitokset myös muille työtovereille, jotka ovat perehdyttäneet minua alalle ja avustaneet tämän työn eri vaiheissa.

Työtä valvonutta professori Tapio Luttista kiitän asiantuntevista neuvoista ja kommentista työhön liittyen.

Erityisesti haluan kiittää perhettäni ja kavereitani, joiden tarjoama tuki on ollut opiskeluaikana korvaamatonta.

Espoo 19.12.2014

Kalle Syrjäläinen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	1
Merkinnät ja lyhenteet	3
1 Johdanto	4
1.1 Työn tausta	4
1.1.1 IVAR-ohjelmisto	4
1.2 Työn tavoite	5
2 Liittymien viivytykset ja toiminnan analysointi	6
2.1 Viivytyksen määrittely	6
2.2 Viivytysten arviointi ja mallintaminen	9
2.2.1 Analyttiset menetelmät	9
2.2.2 Simulointiohjelmistot	10
2.2.3 Erot analyttisten menetelmien ja simulointiohjelmien toiminnassa	11
2.2.4 Erot analyttisten menetelmien ja simulointiohjelmien tuloksissa	12
2.2.5 Eri menetelmien vertailu ja validointi	12
2.3 Liittymien toiminnan analysointi	13
2.3.1 Valo-ohjauksettomien liittymien toiminta ja välityskyky	13
2.3.2 Valo-ohjauksettomien liittymien viivytykset	14
2.3.3 Valo-ohjauksisten liittymien toiminta ja välityskyky	17
2.3.4 Valo-ohjauksisten liittymien viivytykset	18
2.4 IVAR-ohjelmiston nykyiset viivytysmallit	21
3 Simulointiohjelmiston valinta	22
3.1 Lähtökohdat	22
3.2 Liittymän mallintaminen ja simuloinnit	22
3.3 Simulointitulokset	24
3.4 Paramics simulointiohjelmistona	25
4 Viivytysmallien muodostaminen	27
4.1 Yleistä	27
4.2 Liittymätyypit	27
4.3 Simuloinnit	27
4.3.1 Liittymämallit	27
4.3.2 Liikennemäärät	28
4.3.3 Simulointiajot ja tulosten määrittäminen	30
4.4 Matemaattiset mallit	31
5 Tulokset	32
5.1 Regressioanalyysien tulokset	32
5.2 Viivytysmallit	36
5.3 Tulosten tarkastelu	39
6 Liittymämallit IVAR-ohjelmiston versiossa 3.0	41
6.1 Solmujen ominaisuudet	41
6.2 Liittymien laskentamallit	41
6.3 Liittymätyypit	42
7 Case-tutkimus: Meijeritien ja Monninkyläntien liittymä	44
8 Yhteenveto ja johtopäätökset	47
8.1 Yhteenveto	47
8.2 Mallien luotettavuus ja yleistettävyys	47

8.3 Suositukset.....	49
Lähdeluettelo.....	50
Liiteluettelo	53
Liitteet	

Merkinnät ja lyhenteet

AHT	Aamuhuipputunti, eli suurin yhden aamutunnin aikana esiintynyt liikennemäärä
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
HCM	Highway Capacity Manual
IHT	Iltahuipputunti, eli suurin yhden alkuillan tunnin aikana esiintynyt liikennemäärä
IVAR	Investointihankkeiden Vaikutusten ARvointiohjelmisto
KVL	Keskivuorokausiliikenne, eli vuoden kaikkien päivien liikennemäärien summa jaettuna vuoden päivien lukumäärällä
C	Välityskyky
S	Palveluaika
W	Viive
W_a	Kiihdytysviive
W_d	Hidastusviive
W_N	Nesteanalogiamallin keskiviive
W_q	Jonotusviive
W_r	Satunnaisviive
W_s	Pysähdysviive
q	Liikennemäärä
v	Nopeus
x	Etäisyys tieosuuden alusta
ρ	Käyttösuhde

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Liikenneviraston Tiehankkeiden arviointiohje uusittiin vuonna 2013 (Liikennevirasto 2013a). Aiempaan tiehankkeita koskevaan ohjeeseen verrattuna uusitus ohjeessa hankkeen vaikuttavuuden arvioinnin roolia on lisätty kannattavuuslaskennan rinnalla. Tiehankkeiden vaikutuksia arvioidaan yhteiskuntataloudellisesta näkökulmasta. Tarkastelun kohteena ovat tällöin kaikki ne vaikutukset, joilla on merkitystä päätöksenteossa eli suunnitteluvaihtoehtojen valinnassa, investointien priorisoinnissa ja toteutuspäätöksissä. Yleensä tarkasteltavia vaikutuksia ovat ainakin tienkäyttäjien, liikenneturvallisuuden, ympäristöön ja julkiseen talouteen kohdistuvat vaikutukset.

Suomessa tiehankkeiden yhteiskuntataloudellisten vaikutusten arviointiin käytetään varsin laajasti Investointihankkeiden vaikutusten arviointiohjelmistoa (IVAR) (Ristikartano ym. 2011). IVAR-ohjelmiston nykyiset liittymien laskentamallit on laadittu vuonna 1993 Capcal-ohjelmiston avulla lasketuista havainnoista (Kari 1993). Mallit eivät sovelu uusien ohjeiden edellyttämään vaikuttavuuden arviointiin, koska ne on tehty pelkästään kannattavuuslaskentaa varten.

Malleissa liittymän toimintaa on tarkasteltu kokonaisuutena, ja ne perustuvat erilaisiin ajotapoihin (pysähtyvät, hidastavat ja vapaat ajoneuvot). Koska mallit tarkastelevat liittymää kokonaisuutena, ne eivät sovellu yksittäisten ongelmallisten tulosuuntien käsitteelyyn. Vaikuttavuustarkasteluissa tulosuuntia tulisi kuitenkin voida käsitellä erikseen, jolloin voitaisiin tarkastella erikseen esimerkiksi työmatkaliikenteelle aiheutuvia vaikutuksia. Nykyisistä malleista ei myöskään saada vaikuttavuustarkasteluissa tarvittaviin reittitarkasteluihin käyttökelpoisia tuloksia, kuten matka-aikoja. Lisäksi mallien ylläpito ja kehittäminen on lukuisten parametrien takia käytännössä mahdotonta, jolloin uusia liittymätyyppejä ei voida tarkastella. Mallien lähtökohtana olisi nykyisin käytössä myös aiempaa tarkempaa tietoa muun muassa kaistamääristä.

1.1.1 IVAR-ohjelmisto

Investointihankkeiden vaikutusten arviointiohjelmisto (IVAR) on kehitetty apuvälineeksi hanketason eri suunnitteluvaiheissa. Sitä käytetään myös tiehankkeita koskevan päätöksenteon tukena. Ohjelmiston ensimmäinen versio julkaistiin 1990-luvun alussa, jolloin se korvasi aiemmin tiehankkeiden arvioinnissa käytetyn KEHAR-ohjelmiston. Viimeinen merkittävä ohjelmistopäivitys on tehty vuonna 2001, jolloin IVAR-ohjelmisto päivitettiin toimimaan Windows-ympäristössä. (Ristikartano ym. 2011.)

IVAR-ohjelmistolla määritetään tiehankkeiden matka-aika-, onnettomuus-, ajoneuvo-, päästö- ja meluvaikutuksia ja muunnetaan vaikutukset rahamääräisiksi. Ohjelmiston toiminta perustuu tieverkon kuvaamiseen linkkeinä (tieosat) ja solmuina (liittymät ja muut solmut), ja sen avulla voidaan laskea tieverkon tilaa kuvaavia tunnuslukuja eri vuosina. Ohjelmistolla voidaan tarkastella suunnitteilla olevien toimenpiteiden vaikutuksia tieverkkoon ja liikenteeseen sekä vertailla eri vaihtoehtoja. (Ristikartano ym. 2011.)

Ohjelmisto käyttää laskennan lähtötietoina tieverkon ominaisuustietoja, jotka haetaan vuosittain Liikenneviraston ylläpitämästä tierekisteristä. Tietoja voidaan hakemisen jälkeen muuttaa tai korjata, ja niihin voidaan tehdä lisäyksiä. Ominaisuustietojen lisäksi lähtötietoina käytetään eri laskentakaavoihin liittyviä parametreja, joita peruskäyttäjä ei

voi muuttaa. Laskentaprosessi kohdistetaan aina yhteen tieverkkoon kerrallaan, ja siinä määritellään mille vuosille laskenta suoritetaan. Linkkien osalta prosessissa käytetään lähtötietojen lisäksi myös liikenne-ennustetietoja ja linkkien laskentaan liittyviä parametritietoja. Solmujen osalta käytetään lähtötietojen lisäksi muun muassa linkkilaskennasta saatavia liikennemäärä- ja nopeustietoja, solmu-linkkitietoja sekä solmulaskennan parametritietoja. Laskenta sisältää aina sekä linkkien että liittymien laskennan. Laskennan tulostiedot talletetaan tietokantaan linkeille ja solmuille erikseen. (Tiehallinto 2003, Ristikartano ym. 2011.)

Vertailuprosessi tarkastelee aina kahden tieverkon laskentatuloksia summaamalla näitä verkkokohtaisiksi tuloksiksi ja laskemalla näiden välisiä eroja. Lähtötietoina määritellään minä vuosina ja mitä verkkoja vertailu koskee. Yleisimmässä tilanteessa toinen verkoista kuvaa nykytilannetta, ja toinen tieverkko sisältää hankkeeseen suunnitellut toimenpiteet. (Ristikartano ym. 2011.)

1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on uusia liittymien viivytysten laskentamallit hankearviointiin soveltuviksi siten, että ne ovat käytettävissä vaikutusten arviointiohjelmiston uutta versiota varten. Mallit uusitaan nykyisin käytössä oleville liittymätyypeille ja samalla kehitetään uusille liittymätyypeille soveltuvia malleja. Käsiteltävät liittymätyypit kattavat valo-ohjauksettomat ja valo-ohjauksiset liittymät, kiertoliittymät sekä erilaiset eritasoliittymät. Myöhemmässä vaiheessa on tarkoitus tarkastella myös ratkaisuja, joissa sivutien ramppliittymät toimivat sekä valo-ohjauksisina että kiertoliittyminä. Mallit laaditaan siten, että kukin ajosuunta käsitellään erillisenä, jolloin viivytysmallit voidaan luoda erikseen liittymän pää- ja sivusuunnille. Työssä ei tarkastella kevyen liikenteen viivytyksiä. Malleissa ei myöskään huomioida kevyen liikenteen ajoneuvoliikenteelle aiheuttamaa viivytystä.

Mallit laaditaan simuloitujen viivytysten perusteella. Malleja luotaessa viivytyksiä käsitellään saapumissuunnittain keskimääräisinä kokonaisviivytyksinä. Tarkastelutavasta johtuen mallit laaditaan tuntiliikenteiden pohjalta siten, että ne ovat laajennettavissa tuntijärjestyskäyrien avulla kattamaan koko vuorokausiliikenne.

Työn aikana suoritetaan kantatiellä 55 sijaitsevan Meijeritien ja Monninkyläntien alustava hankearviointi, jossa tarkastellaan vaihtoehtoisten liittymätyyppien vaikutuksia ja vaikuttavuuksia matka-aikoihin. Koska nykyisellä IVAR-ohjelmistolla ei voida arvioida vaikutuksia tulosuunnittain, määritetään vaihtoehtoisten liittymätyyppien matka-ajat työssä simulointien avulla. Simulointituloksia voidaan hyödyntää myös tämän työn tulosten arvioimisessa.

IVAR-ohjelmiston päivittäminen versioon 3.0 on käynnistetty vuoden 2014 alussa ja sen arvioidaan valmistuvan kesällä 2015. Uudistettavassa ohjelmistoversiossa on varauduttu liittymämallien uusimiseen, jolloin tässä työssä kehitettävät mallit voidaan ottaa käyttöön jo ohjelmistoversiota testattaessa.

2 Liittymien viivytykset ja toiminnan analysointi

2.1 Viivytyksen määrittely

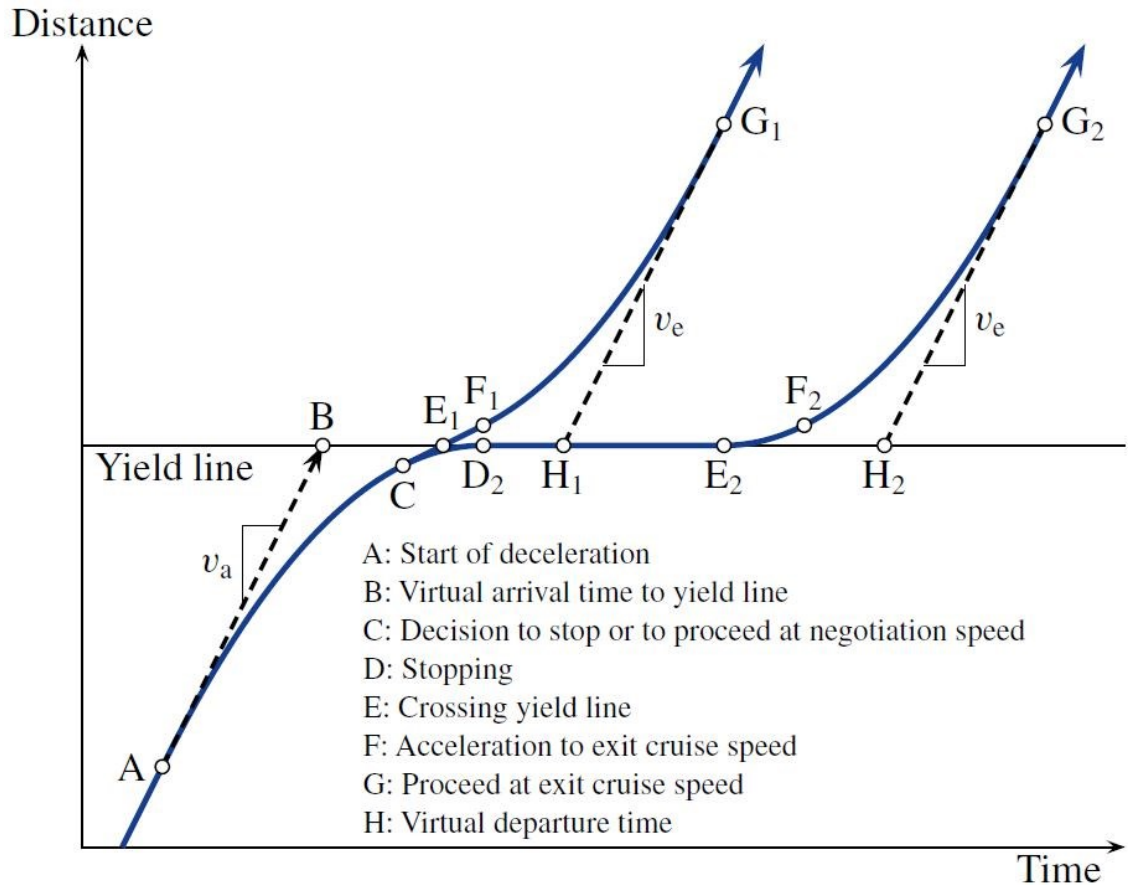
Viivytyksellä tarkoitetaan sitä ylimääräistä aikaa, joka ajoneuvon kuljettajalle, matkustajalle tai jalankulkijalle aiheutuu siitä, että liikenneolosuhteet estävät halutun liikkeen tekemisen (Transportation Research Board 2014). Viivytyksiä käytetään yleisesti liittymien palvelutason kuvaamisessa. Viivytykset vaikuttavat myös olennaisesti matkanopeuteen ja matka-aikaan. Matka-aikoja käytetään yleisesti tiehankkeiden arvioinnissa vaikuttavuuden mittarina, ja matka-aikasäästöjen perusteella määritetyt aikakustannukset muodostavat merkittävän osan hankkeiden kannattavuuslaskelmaan sisältyvistä hyödyistä.

Kokonaisviivytys määritellään toteutuneen matka-ajan ja vapaalla nopeudella, ilman viivytyksiä ajetun vertailumatka-ajan erotuksena (Transportation Research Board 2014). Kokonaisviivytys voidaan määritellä koostuvaksi seuraavien komponenttien summana (Transportation Research Board 2010):

- Ohjausviive (Control delay). Liittymän ohjaustavasta johtuva viive, joka koostuu hidastamisesta, pysähdyksissä olemisesta ja uudelleen kiihdyttämisestä johtuvista viiveistä.
- Geometrinen viive (Geometric delay). Liikenneympäristön geometriasta johtuvan nopeuden aleneman aiheuttama viive.
- Häiriöviive (Incident delay). Häiriön, kuten tietyön tai onnettomuuden, aiheuttama viive.
- Liikenneviive (Traffic delay). Muista ajoneuvoista johtuvan nopeuden aleneman aiheuttama viive.

Liittymän geometrinen viive on myös osittain riippuvainen ohjausviiveestä, sillä liittymän ohjaustavasta aiheutuva viive saattaa osittain kompensoida liittymän geometriasta aiheutuvaa viivettä. Ajoneuvon joutuessa pysähtymään esimerkiksi pysähtymispakon takia, ei liittymän geometriasta aiheudu sille jarrutusvaiheessa lisäviivettä. Valo-ohjauksettomia liittymiä tarkasteltaessa muun liikenteen aiheuttama viive luetaan usein kuuluvaksi liittymän ohjausviiveeseen. Häiriöitä ei normaaliolosuhteissa oleteta tapahtuvan, ja niistä aiheutuvia viivytyksiä tulee aina tarkastella erikseen. Näin ollen ohjausviive ja geometrinen viive ovat olennaisimmat viiveen komponentit valo-ohjauksettomia liittymiä tarkasteltaessa. (Luttinen 2004.)

Kuvassa 1 on esitetty kaksi vaihtoehtoista ajoneuvon liikerataa valo-ohjauksettomassa väistämismatkassa liittymässä. Ensimmäisen liikeradan ajoneuvo saapuu muusta liikenteestä vapaaseen liittymään, jolloin se lähestyy liittymää tasaisella lähestymisnopeudella (v_a), hidastaa (A-C) niin sanottuun neuvottelunopeuteen, jolla se ajaa liittymän läpi (C-F₁), ja kiihdyttää (F₁-G₁) tasaiseen poistumisnopeuteen (v_e).



Kuva 1. Liikeradat väistämivelvollisessa liittymässä (Luttinen 2004).

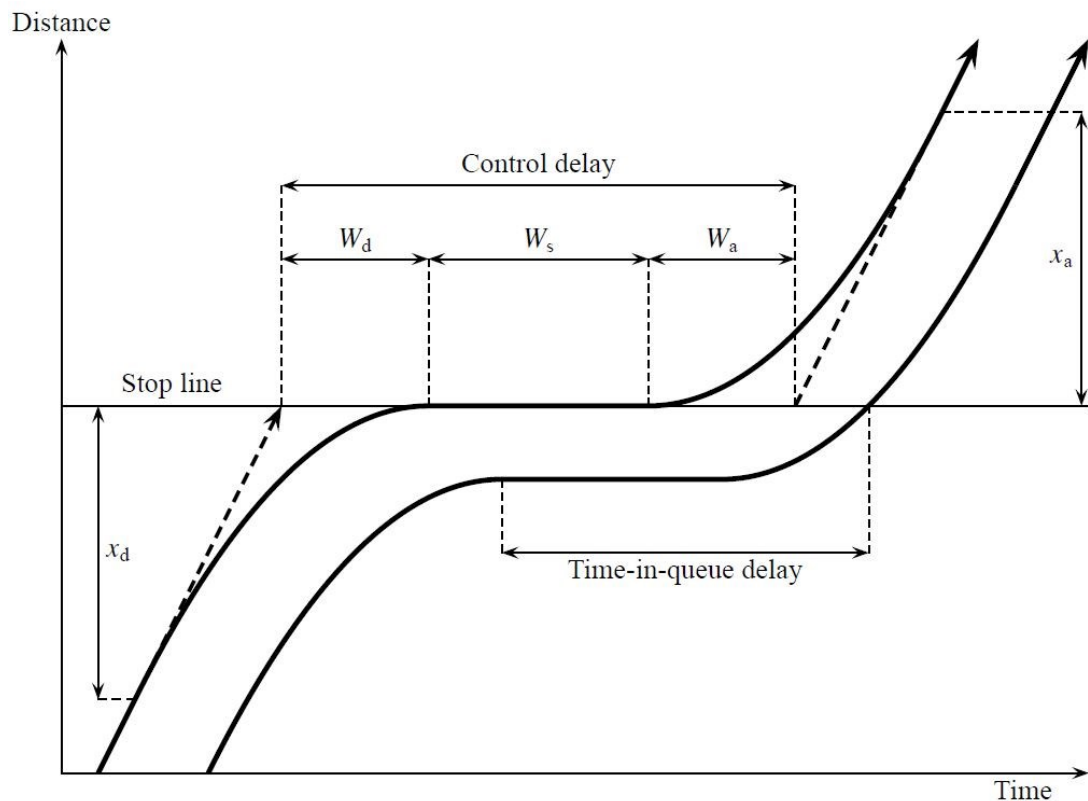
Katkoviivalla merkityllä vertailuliikeradalla ajoneuvot saapuvat liittymään tasaisella lähestymisnopeudella (v_a) ja poistuvat liittymästä tasaisella poistumisnopeudella (v_e). Tällöin nopeuden hidastamiseen, neuvottelunopeudella ajamiseen ja uudelleen kiihdyttämiseen kuluva aika voidaan määrittellä näennäisten poistumis- ja saapumisaikojen (H_1 , B) erotuksena. Koska niihin kuluva ylimääräinen aika on riippuvainen liittymän geometriasta, eikä siihen vaikuta muu liikenne tai liittymän ohjaustapa, kutsutaan sitä geometriseksi viiveeksi. (Luttinen 2004.)

Mikäli ajoneuvo joutuu pysähtymään, se hidastaa ja pysähtyy (A-D₂), odottaa seuraavaa riittävän suurta vapaata aikaväliä (D₂-E₂), kiihdyttää ensin neuvottelunopeuteen (E₂-F₂) ja lopuksi poistumisnopeuteen (F₂-G₂). Tällöin kokonaisviivytys voidaan määrittellä näennäisten poistumis- ja saapumisaikojen (H_2 , B) erotuksena.

Kuvan 1 tilanteessa oletetaan, ettei geometriasta aiheudu pysähtyvälle ajoneuvolle ylimääräistä viivytystä. Kuvan liikeratoja verrattaessa pysähtymään joutuvalle ajoneuvolle aiheutuu näennäisten poistumisaikojen (H_2 , H_1) erotuksen suuruinen netto-ohjausviive. Jos kääntyvä ajoneuvo pystyy kiihdyttämään poistumisnopeuteen vasta liittymästä poistuttuaan, geometrista viivettä ei voida jättää huomiotta, mutta geometriasta aiheutuva viive on huomattavasti pienempi kuin poistumis- ja saapumisaikojen (H_1 , B) erotuksena määritettävä geometrinen viive, joka ei sisällä ohjausviivettä. Tämä viittaa Luttisen (2004) mukaan ohjausviiveen ja geometrisen viiveen väliseen riippuvuuteen, joka voidaan määrittellä kahdella tavalla:

1. Ohjaussuuntautuneen määritelmän mukaan ohjausviive sisältää sekä liittymän ohjaustavasta että muusta liikenteestä aiheutuvat viiveet, jolloin se voidaan määritellä näennäisten poistumis- ja saapumisaikojen (H_2 , B) erotuksena.
2. Vertailusuuntautunut määritelmä käyttää geometrista viivettä vertailukohtana, jolloin ohjausviive on kokonaisviiveen ja geometrisen viiveen erotus. Tällöin ohjausviive on todellinen liittymän ohjaustavasta ja muusta liikenteestä aiheutuva viivytys, joka voidaan määritellä näennäisten poistumisaikojen (H_2 , H_1) erotuksena.

Kuvassa 2 on esitetty kahden liikennevaloihin punaisen opastinkuvan aikana peräkkäin saapuvan ajoneuvon liikeradat. Lähestyessään liittymää opastimen ollessa punaisena, ajoneuvo hidastaa ja pysähtyy joko pysäytysviivalle tai jonon perään. Opastimen vaihtuessa vihreäksi pysäytysviivan edessä oleva ajoneuvo alkaa kiihdyttää ja ylittää pysäytysviivan. Ajoneuvojen välisen etäisyyden ollessa riittävän suuri, alkaa jonossa seuraavana oleva ajoneuvo kiihdyttää.



Kuva 2. Liikeradat valo-ohjauksisessa liittymässä (Luttinen & Nevala 2002).

Viivytys on tärkein kriteeri valo-ohjauksisten liittymien toimivuuden arvioinnissa. Viivytys voidaan määritellä usealla eri tavalla, joista yleisimmin käytettyjä ovat (Luttinen & Nevala 2002):

- Pysähdysviive (Stop delay, W_s). Aika, jonka ajoneuvo on pysähdyksissä odottaessaan punaisen valon vaihtumista vihreäksi.
- Jonotusviive (Time-in-queue delay, W_q). Aika, joka alkaa ajoneuvon pysähtyessä jonon perään, ja päättyy ajoneuvon ylittäessä pysäytysviivan.

- Ohjausviive (Control delay). Toteutuneen ajoajan ja vihreän valon aikana ilman muuta liikennettä ajatun ajoajan erotus.

Ohjausviive koostuu valo-ohjauksettoman liittymän tapaan hidastamisesta, pysähdyksissä olemisesta ja kiihdyttämisestä johtuvista viiveistä (W_d , W_s ja W_a).

Koska geometrinen viive on ohjausviiveestä riippuvainen, saattaa valo-ohjauksesta aiheutuva nopeuden hidastaminen kompensoida liittymän geometriasta aiheutuvaa nopeuden hidastamista. Ajoneuvon joutuessa pysähtymään punaisen valon takia geometriasta ei aiheudu sille lisäviivettä (Luttinen & Nevala 2002).

Liittymien viivytyksiä arvioitaessa saapuvan liikenteen oletetaan usein noudattavan tiettyä jakaumaa, kuten binomi- tai Poisson-jakaumaa. Oletus ei kuitenkaan ole voimassa tilanteessa, jossa liittymän läheiset valo-ohjauksiset liittymät vaikuttavat saapuvan liikenteen määrään ja jakaumaan. Liikennevalojärjestelmän toiminta poikkeaa kuitenkin usein erillisohjauksisen liittymän toiminnasta. Esimerkiksi yhteenkytkentä yleensä vähentää pysähdysten määrää ja viivytyksiä, sillä saapumisjakaumat ovat tällöin erilaisia vihreän ja punaisen vaiheen aikana. (Rouphal ym. 2002.)

2.2 Viivytysten arviointi ja mallintaminen

2.2.1 Analyttiset menetelmät

Liittymien aiheuttamia viivytyksiä voidaan arvioida erilaisilla tieliikenteen toimivuuden arviointiin kehitetyillä analyttisillä menetelmillä ja niihin perustuvilla tietokoneohjelmilla. Analyttisistä menetelmistä Suomessa on käytetty esimerkiksi yhdysvaltalaisista Highway Capacity Manualia, tanskalaista DanKapia, ruotsalaista Capcalia ja suomalaista LIVASUa. (Liikennevirasto 2013b.)

Highway Capacity Manual (HCM) on yhdysvaltalaisen Transportation Research Boardin julkaisema kokonaisuus, joka sisältää ohjeita ja laskentamalleja välityskyvyn ja palvelutason laskemiseksi erityyppisille tieosuuksille, liittymille sekä ramppi- ja sekoittumisolueille. Ensimmäinen versio HCM:sta julkaistiin vuonna 1950, minkä jälkeen siitä on julkaistu useita päivityksiä. Uusin versio on julkaistu vuonna 2010 ja se sisältää menetelmiä myös kevyen liikenteen tarkasteluun. HCM:n pohjalta on laadittu laskentaohjelma Highway Capacity Software (HCS). HCM:sta on kehitetty myös omia, eri maiden olosuhteisiin soveltuvia malleja ja menetelmiä.

Capcal on Ruotsin tielaitoksen kehittämä ohjelma liittymien välityskyvyn ja palvelutason laskemiseen. Capcalilla voidaan tarkastella sekä valo-ohjauksettomia, valo-ohjauksisia että kiertoliittymiä. Ohjelmasta on kehitetty 1990-luvulla myös oma, erityisesti suomalaisiin oloihin sovitettu versio.

DanKap on Tanskan tielaitoksen kehittämä ohjelma, jolla voidaan tarkastella valo-ohjauksettomien ja valo-ohjauksisten liittymien välityskykytarkasteluihin sekä sekoittumisoluiden tarkasteluun. Ohjelma on kehitetty HCM:n pohjalta tanskalaisiin olosuhteisiin soveltuvaksi, ja sillä voidaan tarkastella myös polkupyörä- ja mopoliikennettä.

Liikennevalojen suunnittelu (LIVASU) on Tiehallinnon (nyk. Liikennevirasto) julkaisema ohje liikennevalojen suunnitteluun. LIVASU soveltuu liittymätyypin valintaan valo-ohjauksisen ja valo-ohjauksettoman liittymän välillä, valo-ohjelmien suunnitteluun sekä valo-ohjauksisten liittymien välityskykytarkasteluihin. Sen avulla voidaan laskea

esimerkiksi liittymän kuormitusaste ja käyttösuhde. Liittymän käyttösuhteen laskemiseksi on myös kehitetty LIVASUun perustuva KSuhde-ohjelma.

Liikennevirran ominaisuudet -kirjassa (Luttinen ym. 2005) sekä Liikenne ja väylät I -käsikirjassa (Ojala 2005) on esitetty Luttisen (2004) teoreettisten laskentatulosten ja simulointikokeiden perusteella määrittämät välityskyvyn ja viiveiden laskentamenetelmät sekä tavanomaisille valo-ohjauksellomille liittymille että kiertoliittymille.

Analyttisiä menetelmiä on kehitetty myös erityisesti kiertoliittymien tarkasteluun. Bovy-kaava on hollantilainen kiertoliittymän välityskyvyn arviointiin kehitetty laskentamenetelmä. Kaavan pohjalta on myös kehitetty Meerstrooksrotondeverkenner-ohjelma, joka on tarkoitettu monikaistaisten kiertoliittymien toimivuuden tarkistamiseen. Ohjelmaa voidaan käyttää Suomessa apuvälineenä kiertoliittymien kaistamäärien määrittelyssä, mutta laajempi käyttö edellyttäisi Bovy-kaavan kertoimen kalibrointia suomalaisiin olosuhteisiin. (Liikennevirasto 2013b).

2.2.2 Simulointiohjelmistot

Simulointiohjelmistojä on markkinoilla useita eri tarkoituksiin ja eri tarkkuustasoille soveltuvina. Liikennettä voidaan simuloida makro-, meso-, ja mikrotasolla. Makrotasolla liikennevirtoja tarkastellaan kokonaisuuksina, kun taas mikrotasolla tarkastellaan yksittäisiä ajoneuvoja. Mesotaso on näiden välimuoto, jossa tarkastellaan ajoneuvoryhmiä. Suomessa yleisimmin käytettyjä mikrosimulointiohjelmia ovat Paramics, Synchro/SimTraffic ja Vissim. (Liikennevirasto 2013b.)

Paramics on skotlantilainen, alun perin Edinburghin yliopistossa kehitetty ja nykyisin Quadstone Paramics Ltd:n omistama mikrosimulointiohjelma. Paramics perustuu liikenneverkon kuvaamiseen solmuina ja linkkeinä. Sillä voidaan tarkastella sekä yksittäisiä liittymiä että laajempia liikenneverkkoja.

Synchro/SimTraffic on yhdysvaltalainen, Trafficware-yrityksen omistama, pääasiassa liikennevalo-ohjauksisten liittymien tarkasteluun kehitetty ohjelmisto. Se koostuu kahdesta eri ohjelmasta; Synchrosta, jolla luodaan malli, sekä SimTrafficista, jolla suoritetaan simuloinnit. Ohjelmistolla voidaan esimerkiksi optimoida liikennevalojen kiertoaikoja sekä eri vaiheiden pituuksia liikennemäärien perusteella, mutta se soveltuu myös valo-ohjauksellomien liikennemäärien toimivuuden arviointiin. Synchroa voidaan käyttää myös erillään SimTrafficista, mutta silloin sitä voidaan pitää vain analyttisenä menetelmänä.

Vissim on saksalainen PTV Groupin kehittämä mikrotason simulointiohjelma. Paramicista poiketen Vissimissa liikenneverkko koostuu linkeistä ja niiden välisistä yhdistimistä (connector), mikä mahdollistaa liikenneverkon yksityiskohtaisen mallintamisen, mutta lisää samalla siihen kuluvaä aikaa.

Taulukossa 1 on esitetty Paramicsin, Synchro/SimTrafficin ja Vissimin keskeisiä ominaisuuksia. Muita Suomessa ja kansainvälisesti käytettyjä mikrosimulointiohjelmia ovat esimerkiksi suomalainen HUTSIM, espanjalainen Aimsun, kanadalainen Integration ja yhdysvaltalainen Corsim (Kosonen 2000).

Taulukko 1. Simulointiohjelmien keskeisiä ominaisuuksia (Liikennevirasto 2013b).

Ohjelman nimi	PARAMICS	SYNCHRO/SIMTRAFFIC	VISSIM
Ohjelman kehittäjä	Quadstone	Trafficware	PTV Vision
Ohjelman kotimaa	Skotlanti/Iso-Britannia	Yhdysvallat	Saksa
Pääasialliset käyttökohteet	Ajoneuvosimulointi (kaupunkiympäristö ja maantiet)	Liikennevalosuunnittelu	Ajoneuvosimulointi (kaupunkiympäristö ja maantiet)
Muut käyttökohteet	Kevyt liikenne, joukkoliikenne	Valo-ohjaamattomat liittymät	Kevyt liikenne, joukkoliikenne
Vahvuudet	Dynaaminen reitinvalinta, tulosten analysointi	Valojen optimointi, vihreät aallot	Matkaketjut, kaupunkiympäristö, animaatio
Heikkoudet	Animaation epätarkkuudet	Kiertoliittymätarkastelut	Graafinen tulostus
Kohdemallin koko	Pienet ja suuret mallit, erityisesti suuret alueet ja maantieympäristö	Pienet mallit	Pienet ja suuret mallit, erityisesti kaupunkiympäristö

2.2.3 Erot analyttisten menetelmien ja simulointiohjelmien toiminnassa

Analyttiset menetelmät perustuvat empiirisiin havaintoaineistoihin ja liikennevirtateoriaan, ja ne käsittelevät liikennettä tilastollisena ilmiönä. Ne tuottavat annettuihin lähtötietoihin perustuen kaista- tai kaistaryhmäkohtaista liittymän tai tiejakson toimivuutta kuvaavia tunnuslukuja, kuten jonopituudet, viivytykset tai palvelutasoluokat. (Liikennevirasto 2013b.)

Simuloinnilla tarkoitetaan todellisuuden jäljittelyä tietokoneelle ohjelmoidun mallin avulla. Liikenteen simulointi tarkoittaa siis liikenneinfrastruktuurin ja siinä kulkevan liikenteen kuvaamista liikenneympäristöä jäljittelevän tietokonemallin avulla. Mallin tarkastelu on dynaamista, eli ilmiön muutoksia seurataan ajan funktiona. Simulointi ei sisällä matemaattista ratkaisua, vaan analysointi tapahtuu mallin toimintaa seuraamalla ja tuloksia tilastoimalla. Liikenteen toimivuutta kuvaavien tunnuslukujen lisäksi toimivuutta voidaan usein arvioida simulointimallin tuottaman animaation avulla. (Hannus & Louhenkilpi 1971, Liikennevirasto 2013b.)

Analyttiset menetelmät ovat deterministisiä, eli samoilla lähtötiedoilla saadaan aina samat tulokset. Simulointiohjelmat taas ovat luonteeltaan stokastisia, eli niiden tulokset perustuvat tietyn siemenluvun määräämiin satunnaislukuihin. Satunnaisluvut tuottavat samoilla lähtöoletuksilla satunnaisvaihtelua, joka vastaa jokaisen päivän ainutkertaisuutta. Sama siemenluku tuottaa aina täsmälleen saman joukon satunnaislukuja, jolloin samalla siemenluvulla saadaan aina samat tulokset. Vastaavasti eri siemenlukuja käyttämällä saadut tulokset poikkeavat toisistaan, mikä on otettava huomioon tuloksia tarkasteltaessa. Mitä useammalla siemenluvulla simuloinnit ajetaan, sitä kattavampi ja luotettavampi otos saadaan. (Liikennevirasto 2013b.)

Analyttisiin menetelmiin perustuissa ohjelmissa voidaan säätää joitakin paikallisiin olosuhteisiin liittyviä parametreja, kuten kriittistä aikaväliä tai ominaisvälityskykyä. Mikroskooppisten liikenteen simulointiohjelmistojen lähes kaikkia ominaisuuksia voidaan säätää useiden parametrien avulla ja jokaisella on ainakin vähäinen vaikutus mallin toimintaan ja saataviin simulointituloksiin. Simulointiohjelmistojen muokattavat para-

metrit vaihtelevat ohjelmistoittain. Yleisesti ottaen parametrit voidaan jakaa koko mallia koskeviin parametreihin ja yksittäisiä elementtejä, kuten linjaosuuksia tai liittymiä koskeviin parametreihin. Koko verkkoa koskevia parametreja ovat esimerkiksi Synchro/SimTrafficissa määriteltävä ajoneuvojen pituus tai Paramicsissa määritettävä Time Steps eli aika-askelten määrä, joka kertoo ajoneuvon kuljettajan päätöksentekohetkien määrän simulointisekuntia kohden. Yksittäisiin elementteihin vaikuttavia parametreja ovat esimerkiksi Paramicsin Reaction Factor ja Headway Factor -kertoimet, joilla vaikutetaan kuljettajien reaktionopeuteen ja seuranta-aikaväleihin saavuttaessa liittymään, sekä Approach Visibility -tekijä, joka määrittää kuljettajan päätöksentekonäkemän liittymään saavuttaessa. (Liikennevirasto 2012, Liikennevirasto 2013b.)

Koska analyttisten menetelmien käyttö on selkeästi ohjeistettua ja olosuhteisiin liittyvien parametrien määrä on suhteellisen vähäinen, käyttäjällä on rajalliset vaikutusmahdollisuudet saataviin tuloksiin. Simulointiohjelmissa käytettävillä parametreilla voidaan puolestaan vaikuttaa merkittävästi ajoneuvokäyttäytymiseen, jolloin ohjelman käyttäjällä on suuri vaikutusmahdollisuus saataviin tuloksiin. Tulosten oikeellisuuden kannalta on olennaista, että ohjelmat kalibroidaan joko kenttämittauksin tai validoitujen analyttisten menetelmien avulla vastaamaan tarkastelukohteen olosuhteita. (Liikennevirasto 2013b, Gagnon ym. 2008.)

2.2.4 Erot analyttisten menetelmien ja simulointiohjelmien tuloksissa

HCM:n mukaisen laskennan tuloksena saadaan liittymän keskimääräinen ohjausviive, jonka määrittäminen riippuu liittymän ohjaustavasta. Ohjausviive koostuu liittymän ohjauksesta aiheutuvasta nopeuden hidastamisesta liittymään saavuttaessa, jonotus- ja odotusajasta sekä kiihdytyksestä takaisin vapaaseen nopeuteen. HCM:n menetelmä ei ota huomioon saapuvien linkkien pituuksia eikä niiden nopeusrajoituksia, jotka voivat kuitenkin vaikuttaa nopeuden hidastamisesta ja kiihdyttämisestä aiheutuvaan viivytykseen suuremman nopeuden vaatiessa myös pidempiä jarrutus- ja kiihdytysaikoja. (Transportation Research Board 2010, Tian ym. 2002.)

HCM:n viive huomioi tarkasteluajana liittymään saapuvat ja tarkasteluajan päättyessä jonossa olevat ajoneuvot. Simulointiohjelmat sen sijaan huomioivat tuloksissaan vain liittymästä tarkastelujakson aikana poistuvat ajoneuvot. Tämä voi aiheuttaa tuloksiin eroavaisuuksia tarkasteltaessa liittymiä, joiden välityskyky on ylittynyt tai mikäli tarkastelujakso on lyhyt. (Transportation Research Board 2010, Tian ym. 2002.)

Useimmat simulointiohjelmat puolestaan ilmoittavat viivytyksen linkeittäin ajoneuvon keskimääräisenä kokonaisviivytyksenä, joka lasketaan ajoneuvon toteutuneen ajoajan ja vapaan nopeuden ajoajan erotuksena. Viivytyksellä pitää tällöin ohjausviiveen lisäksi sisällyttää myös liikenneympäristön geometriasta ja muusta liikenteestä aiheutuvan viivytyksen. Kokonaisviivytyksen lisäksi Paramicsissa, SimTrafficissa ja Vissimissa on mahdollista määrittää myös linkeittäinen pysähdysviive.

Edellä mainituista syistä johtuen HCM:n ja muiden analyttisten menetelmien tuloksia ei voida suoraan verrata simulointiohjelmissa saatuihin tuloksiin, eikä simulointitulosten perusteella voida määrittää esimerkiksi HCM:n mukaisia liittymien palvelutasoja.

2.2.5 Eri menetelmien vertailu ja validointi

Suomessa simulointiohjelmistojen vertailua ovat tehneet esimerkiksi Teknillinen korkeakoulu ja konsulttitoimistot erityisesti 1990-luvulla (Liikennevirasto 2012). Tiehal-

linnon (2003) julkaisemassa Liikennetekninen mallintaminen - nykytila, kehityssuunnat ja mahdollisuudet -selvityksessä on esitelty ja vertailtu Pohjoismaissa yleisesti käytettyjä analyttisiä menetelmiä sekä simulointiohjelmistoja. Tarkastellut menetelmät olivat Capcap, DanKap, HCM ja VTI sekä ohjelmistot Aimsun, HUTSIM, Paramics, Vissim ja Synchro/SimTraffic. Liikenneviraston vuonna 2013 julkaisemassa Tieliikenteen toimivuuden arviointi -ohjeessa on käsitelty toimivuustarkasteluissa käytettäviä menetelmiä ja ohjelmistoja sekä esitetty parametrien suositusarvoja Paramicsin, Synchro/SimTrafficin ja Vissimin kalibroimiseksi suomalaisiin olosuhteisiin.

Luttinen ja Nevala (2002) ovat vertailleet teoreettisia tuloksia sekä kolmea analyttistä laskentamenetelmää (HCM2000, DanKap ja Capcal 2) suomalaisiin olosuhteisiin kalibroidulla HUTSIM-simulointiohjelmalla määritettyihin liikennevalo-ohjauksien liittymien keskimääräisiin ohjausviiveisiin. Vertailussa Capcal 2:lla laskettujen ohjausviiveiden havaittiin vastaavan parhaiten HUTSIM-ohjelmalla saatuja viiveitä. Tulosten mukaan suomalaisissa olosuhteissa Capcal 2:a voidaan pitää parhaana sekä aika- että liikennetieto-ohjauksien valo-ohjauksien liittymien analysointiin.

Luttinen (2004) on myös vertaillut analyttisillä menetelmillä ja HUTSIM-ohjelmalla määritettyjä valo-ohjauksettomien liittymien viiveitä. HCM2000:n välityskykyarviot perustuvat oletukseen satunnaisesta liikennevirrasta, jonka havaittiin johtavan suurempaan välityskykyihin kuin simulointitulokset ja Capcal 2 osoittavat.

Simulointiohjelmista Paramics ja Vissim soveltuvat kokemuksen perusteella lähes kaikkiin käyttötarpeisiin, mutta niiden käyttö vaatii oletusparametrien arvojen sovittamista suomalaisiin olosuhteisiin. Synchro/SimTrafficin käyttö kierto- ja eritasoliittymien tarkastelussa on sen sijaan rajoitettua. (Liikennevirasto 2013b.)

Yleisesti ottaen simulointiohjelmien vahvuus analyttisiin menetelmiin verrattuna on niiden soveltuminen liittymien välisten vuorovaikutusten ja laajojen liikenneverkkojen tarkasteluun. Simulointiohjelmissa on myös mahdollista tarkastella erityiskohteita, vaihtoehtoisia kulkutapoja ja erilaisten liikenteen ohjaussovellusten vaikutuksia. Yksittäisiä liittymiä tarkasteltaessa Paramicsin ja Vissimin vahvuutena verrattuna Synchro/SimTrafficiin voidaan pitää niiden soveltuvuutta sekä kiertoliittymien että eritasoliittymien tarkasteluun. (Liikennevirasto 2013b.)

2.3 Liittymien toiminnan analysointi

2.3.1 Valo-ohjauksettomien liittymien toiminta ja välityskyky

Valo-ohjauksettomat liittymät ovat liittymätyypeistä yleisimpiä. Vaikka niiden välityskyvyt ovat muita liittymätyyppejä alhaisempia, on niillä tärkeä rooli liikennejärjestelmän toiminnassa. Myös muiden liittymien toiminnan teoreettinen tarkastelu perustuu valo-ohjauksettoman liittymän tarkastelun teoriaan. (Troutbeck & Brilon 2002.)

Valo-ohjauksettomassa liittymässä ajoneuvon kuljettajaa ei aktiivisesti ohjata, vaan kuljettajan on tehtävä päätös siitä, milloin liittymään ajaminen on turvallista. Väistämisvelvollisen ajoneuvon on odotettava, kunnes aika seuraavaan etuajo-oikeutettuun ajoneuvoon on riittävän suuri, jotta liittymä tai risteäminen voidaan suorittaa. Lisäksi ajoneuvon tulee säilyttää turvallinen aikaväli edellä ajavaan ajoneuvoon. Lyhyintä keskimääräistä etuajo-oikeutettujen ajoneuvojen aikaväliä, jonka väistämisvelvollinen ajoneuvo voi liittymiseen tai risteämiseen käyttää, kutsutaan kriittiseksi aikaväliksi. Purkautumisaikaväliksi kutsutaan keskimääräistä aikaväliä väistämisen tai pysäytysviivan

kohdalla väistämismenettelyn ajoneuvojen muodostaman jono purkautuessa esteettä. (Troutbeck & Brilon 2002, Luttinen ym. 2005.)

Valo-ohjauksettoman liittymän analyysissä on tunnistettava liikennevirtojen väliset väistämissuhteet. Tietyillä liikennevirroilla on etuajo-oikeus, muiden virtojen joutuessa väistämään hierarkian korkeamman tason virtoja. Tarkasteltavaa väistämismenettelyä liikennevirtaa kutsutaan sivuvirraksi, ja siihen nähden etuajo-oikeutettuja virtoja päävirroiksi. Päävirtoja, jotka ovat ylemmän tason liikennevirtoihin nähden väistämismenettelyä, kutsutaan toissijaisiksi päävirroiksi. Aluetta, jolla sivu- ja päävirta risteävät tai liittyvät, kutsutaan konfliktialueeksi. (Troutbeck & Brilon 2002, Luttinen ym. 2005.)

Perinteisesti valo-ohjauksettomien liittymien välityskykylaskelmissa on ollut hallitsevana teoriana kriittisen aikavälin menetelmä. Menetelmässä välityskyky lasketaan päävirtojen aikavälijakauman sekä sivuvirran kriittisen aikavälin ja purkautumisaikavälin perusteella. Muun muassa yhdysvaltalainen HCM, saksalainen HBS ja ruotsalainen Capcal käyttävät kriittisen aikavälin menetelmää. Se on vallitseva menetelmä myös Suomessa. (Luttinen ym. 2005.)

Koska valo-ohjauksettomien liittymien sivuvirran välityskyky riippuu useista parametreista, kuten päävirtojen liikennemäärästä ja liittymän geometriasta, voidaan välityskykyyn estimoinnissa käyttää tilastollisia menetelmiä. Lineaariseen regressioanalyysiin perustuvat välityskykymallit ovat hallitsevia erityisesti Britanniassa. Koska kysymys on käyrän sovittamisesta havaintoaineistoon, menetelmä kuvaa mallin parametrien vaikutusta havaintoaineistoon, mutta ei kuitenkaan mallinna itse liittymätoimintoja, jolloin se jää informaatioarvoltaan vähäiseksi. (Luttinen ym. 2005.)

Kolmas lähestymistapa on Saksassa kehitetty konfliktitekniikka. Siinä liittymän välityskykyyn määrittäminen perustuu nk. additiviin konfliktivirtoihin. Konfliktivirroilla tarkoitetaan virtoja, joiden ajourat risteävät. Menetelmä on hieman kriittisen aikavälin menetelmää yksinkertaisempi käyttää ja se antaa joustavammat mahdollisuuden kevyen liikenteen vaikutusten arviointiin. (Luttinen ym. 2005.)

2.3.2 Valo-ohjauksettomien liittymien viivytykset

Jonoteoriassa palveluaika (S) on se aika, jolloin palvelupiste on varattu. Valo-ohjauksettomassa liittymässä se voidaan määrittellä ajaksi, jolloin ajoneuvo estää seuraavaa ajoneuvoa saapumasta pysäytys- tai väistämismenettelylle. Palveluaika alkaa ajoneuvon saapuessa pysäytysmenettelylle ja loppuu, kun seuraavalla ajoneuvolla on mahdollisuus saapua pysäytysmenettelylle. Toisin sanoen palveluaika loppuu purkautumisaikavälin (t_f) kuluttua siitä, kun edellinen ajoneuvo ylitti pysäytysmenettelyn. Keskimääräinen ohjausviive voidaan siten määrittää seuraavasti (Luttinen ym. 2005):

$$\begin{aligned} W &= W_Q + S - t_f + W_a \\ &= W_S - t_f + W_a, \end{aligned} \tag{1}$$

missä W_S on viipymä jonotusjärjestelmässä ja W_a kiihdytyksestä aiheutuva viive.

Jonoteoreettisissa malleissa liikennetilanteen oletetaan pysyvän muuttumattomana. Usein liikennetilanne kuitenkin vaihtelee esimerkiksi seuraavista syistä (Luttinen ym. 2005):

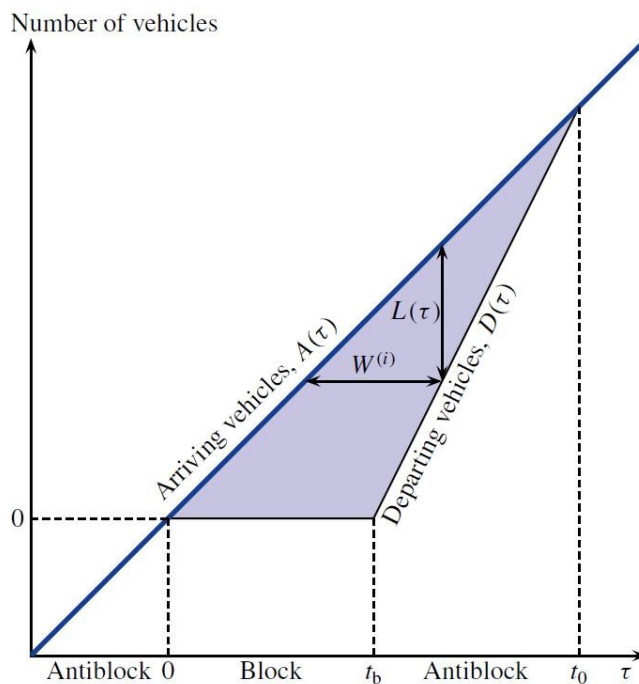
- liikennemäärät tai muut olosuhteet muuttuvat,

- järjestelmä ei saavuta tasapainoa, koska kysyntä ylittää välityskyvyn tai
- edeltävällä tilanteella on vielä vaikutusta järjestelmän toimivuuteen.

Tällaista tilaa kutsutaan väistyväksi (transient). Väistyvässä tilassa järjestelmää kuvaavat tunnusluvut riippuvat tarkasteluajankohdasta ja tarkasteluajan pituudesta. (Luttinen ym. 2005.)

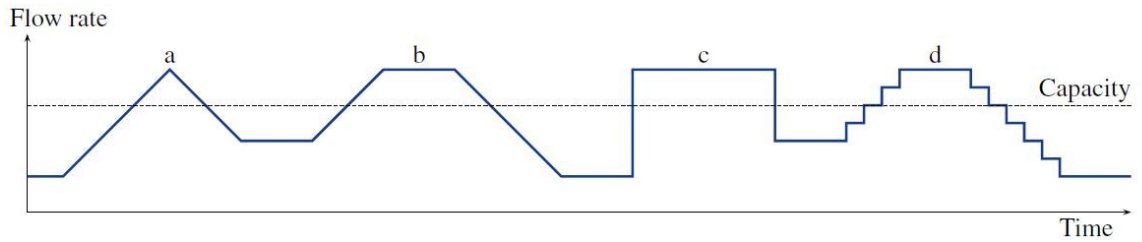
Välityskyvyn käyttösuhteen lähestyessä yhtä tasapainotilanteen saavuttaminen kestää kauan ja liikennetilanne saattaa muuttua ennen tasapainon saavuttamista. Ruuhkan aikana liikennetilanne on jatkuvassa muutoksessa, joten viivytystarkasteluissa tulee ottaa huomioon liikennetilanteen muuttuminen silloin, kuin käyttösuhde on lähellä yhtä tai sen yli. (Luttinen ym. 2005.)

Keskimääräisen saapuvan liikenteen määrän ylittäessä liittymän välityskyvyn syntyy ylikysyntätilanne. Välityskykyä ja viiveitä ylikysyntätilanteessa voidaan arvioida nestevirtausanalogiamallin avulla. Nestevirtausanalogiassa sekä saapuva että poistuva liikenne oletetaan tasaisesti virtaavaksi nesteeksi. Tällöin viiveeksi muodostuu saapuvien (A) ja poistuvien (D) ajoneuvojen kokonaismääriä osoittavien suorien rajoittaman viivytyskolmion pinta-ala (kuva 3). (Luttinen ym. 2005.)



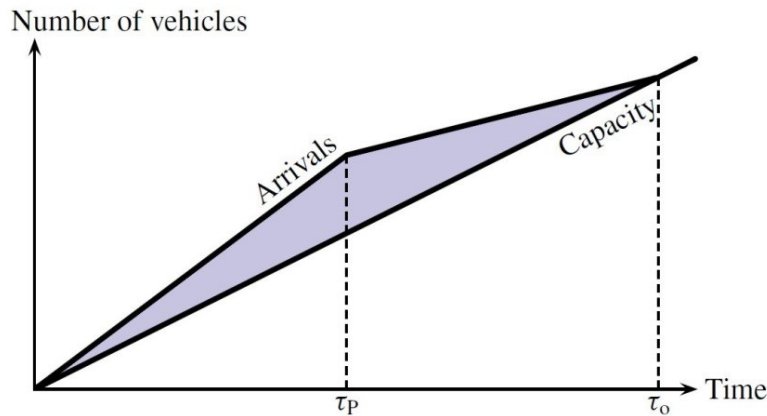
Kuva 3. Nestevirtausanalogiamalli jonon kertymisestä ja purkautumisesta (Luttinen 2004).

Kysyntähuipun aikaisen viivytyksen analysoimiseksi on liikennemäärän lisäksi tiedettävä kysyntähuipun muoto, joka kuvaa liikennemäärän vaihtelua kysyntähuipun sisällä. Kuvassa 4 on esitetty erimuotoisia kysyntähuippuja.



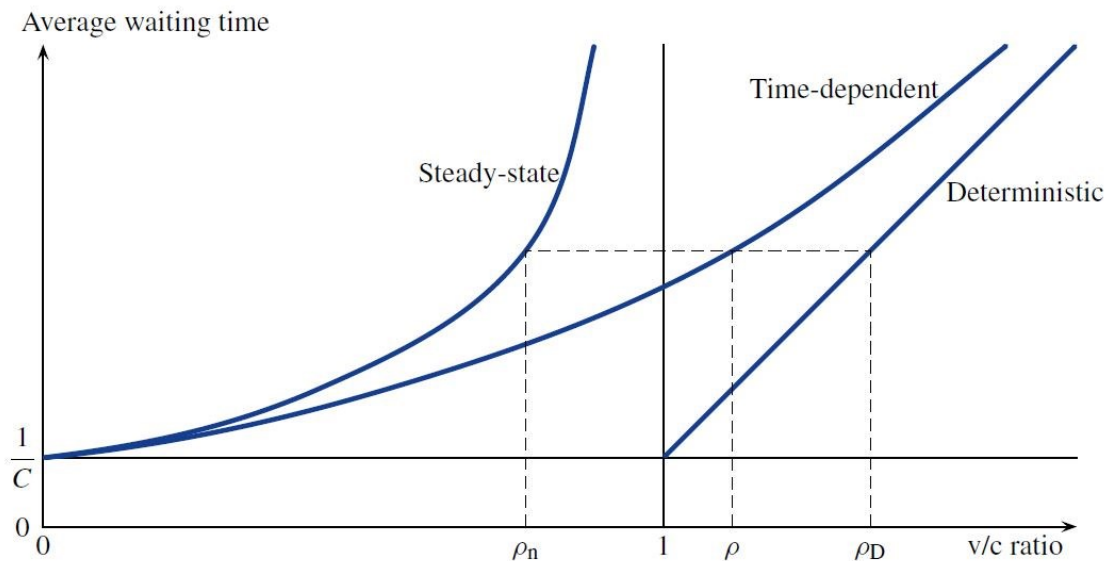
Kuva 4. Kolmion (a), puolisuunnikkaan (b), suorakulmion (c), ja portaittaisen (d) muotoiset kysyntähuiput (Luttinen 2004).

Kuvassa 5 on esitetty suorakulmaisesta kysyntähuipusta aiheutuva kumulatiivinen ajoneuvojen saapumiskäyrä ja välityskyvyn mukainen poistumiskäyrä. Ylikysynnän aiheuttama viive saadaan tällöin suorien muodostaman kolmion pinta-alana kuvan 3 tavoin. Samankaltaisen graafisen tarkastelun avulla voidaan arvioida myös muun muotoisten kysyntähuippujen aiheuttamia viivytyksiä.



Kuva 5. Suorakulmaisesta kysyntähuipusta aiheutuvan ylikysyntätilanteen aiheuttama viive (Luttinen 2004).

Valo-ohjauksettomassa liittymässä väistyvän tilan viivytysten laskenta perustuu usein nk. koordinaattimuutosmenetelmään (kuva 6). Stationaarisuuteen perustuvassa analyysissä viivytys lähestyy asymptoottisesti vertikaalista suoraa $\rho = 1$, jolloin ruuhkatilanteen viivytykset lähestyvät ääretöntä. Koordinaattimuunnos perustuu puolestaan ajatukseen, että viivytys lähestyykin asymptoottisesti nestevirtausanalogialla laskettua determinististä ylikuormitustilanteen viivytyskäyrää.



Kuva 6. Koordinaattimuunnosmenetelmä keskimääräiselle odotusajalle (Luttinen 2004).

Koska sivuvirta voi hyödyntää liittymässä vain päävirroilta käyttämättä jäänyttä välityskykyä, toimivuuden kannalta kriittiseksi jää yleensä hierarkian alin taso, eli sivusuunnalta vasemmalle kääntyvät liikennevirrat. Ruuhkatilanteessa osa päävirran ajoneuvoista saattaa antaa tilaa sivusuunnan ajoneuvoille, jotka puolestaan voivat alkaa hyväksyä lyhyempiä aikavälejä. Tällöin sivusuunnan välityskyky kasvaa hieman ja pääsuunnalle muodostuu viivytyksiä. (Luttinen ym. 2005.)

Kiertoliittymässä sivuvirtana on tulosuunnan saapuva liikenne ja päävirtana tulosuunnan kohdalla kiertävä liikenne. Saapuva virta väistää kiertävää virtaa, johon saapuvat ajoneuvot sekoittuvat. Välityskykylaskelmissa kiertoliittymää tarkastellaan yleensä sarjana peräkkäisiä valo-ohjauksettomia liittymiä. Kussakin liittymässä on tällöin vain yksi sivu- ja yksi päävirta, jolloin liittymisoperaatio ja sen analyysi ovat yleensä yksikertaisempia kuin muissa valo-ohjauksettomissa liittymissä. (Luttinen ym. 2005.)

2.3.3 Valo-ohjauksisten liittymien toiminta ja välityskyky

Valo-ohjauksisen liittymän toiminta riippuu valo-ohjauksen suunnittelun yhteydessä määritellyistä parametreista. Valo-ohjauksen suunnittelulla ja toiminnan analyysillä on siten kiinteä yhteys. (Luttinen ym. 2005.)

Valo-ohjauksen avulla risteävien tulosuuntien väliset liikennevirrat erotetaan toisistaan ajallisesti. Punaisen opastinkuvan aikana liittymään saapuvat ajoneuvot pysähtyvät jonoon odottamaan vihreää opastinkuvaa, jonka aikana jono purkautuu. Liikennevaloille tunnusomainen piirre onkin liikennevirran tiivistäminen jonoiksi erityisesti vilkkaan liikenteen aikana. Tällöin purkautuva liikenne hyödyntää välityskyvyn mahdollisimman tehokkaasti. (Luttinen ym. 2005.)

Valo-ohjelman toistuvien peräkkäisten opastinkuvien muodostamaa sarjaa kutsutaan kierroksi. Aikaohjauksisissa liikennevaloissa ohjaus toistuu samanlaisena kierrosta toiseen, kun taas liikennetieto-ohjauksessa opastinkuvien kesto määräytyy ilmaisinten avulla havaittujen saapuvien liikennevirtojen perusteella. (Luttinen ym. 2005.)

Vihreän aikana jonosta purkautuvien ajoneuvojen aikaväliä pysäytysviivan kohdalla kutsutaan purkautumisaikaväliksi. Noin neljännen ajoneuvon jälkeen ajoneuvojen no-

peuden on havaittu asettuvan lähes vakioksi ja purkautumisaikavälin stabiiliksi. (Luttinen ym. 2005.)

Valo-ohjauksisessa liittymässä välityskyky arvioidaan kullekin kaistalle erikseen. Liikennemäärää, jonka kaista pystyy välittämään olettaen, että sille näytetään jatkuvasti vihreää opastinkuvaa, kutsutaan ominaisvälityskyvyksi. Välityskyky riippuu siten kaistan ominaisvälityskyvystä sekä vihreän ajan osuudesta kiertoajasta. (Luttinen ym. 2005.)

2.3.4 Valo-ohjauksisten liittymien viivytykset

Tunnetuin valo-ohjauksisten liittymien viivytysten arviointimenetelmä on Websterin viivelauseke (Luttinen ym. 2005). Lauseke on muotoa:

$$W = A + B + C, \quad (2)$$

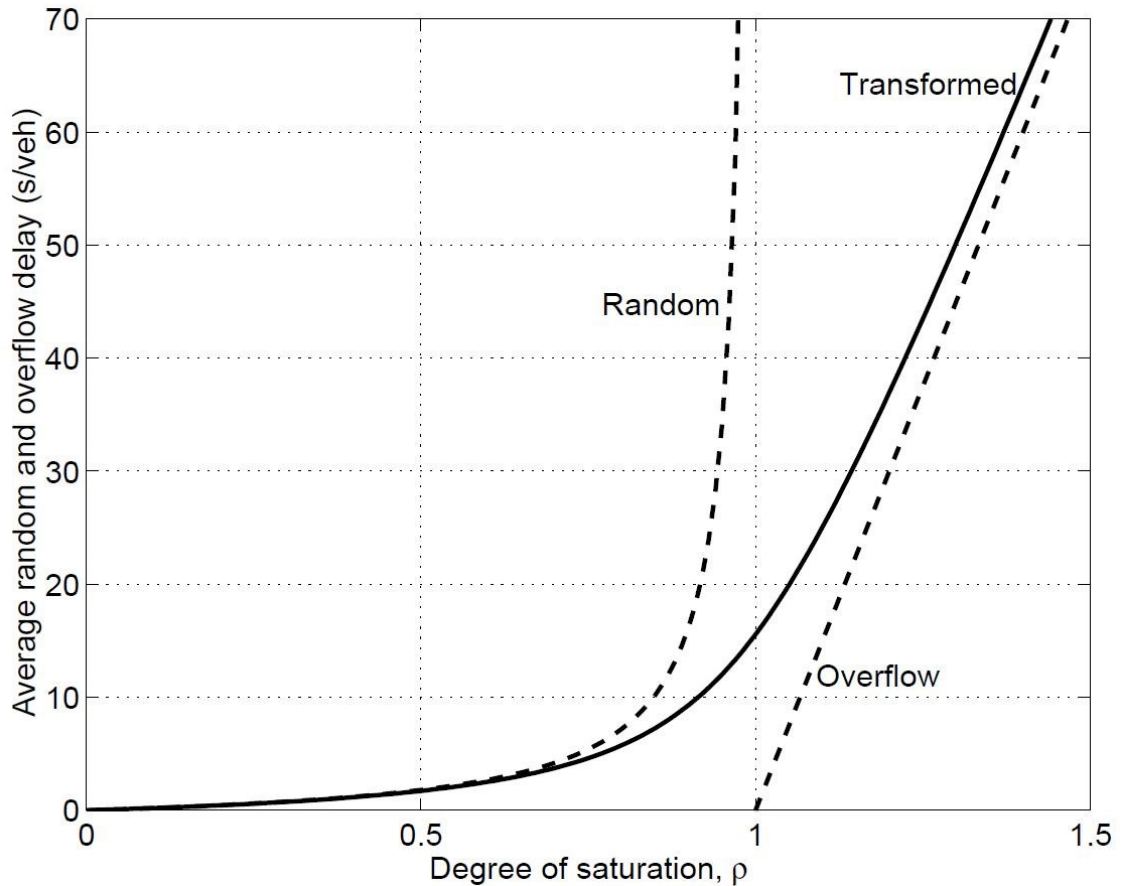
missä A on nestevirtausanalogian mukainen keskiviive (W_N), B kuvaa satunnaisvaihtelun vaikutusta ja C on simuloimalla saatu korjaustermi. Koska korjaustermi on havaittu olevan noin 10 prosenttia keskiviiveestä, käytetään lausekkeesta usein approksimaatiota:

$$W = 0,9(A + B). \quad (3)$$

Websterin lausekkeessa viivytys koostuu viiveestä tasaisessa, nestemäisessä liikennevirrassa ja satunnaisvaihtelun aiheuttamasta lisäviiveestä. Kun välityskyvyn käyttösuhte lähenee yhtä, kasvaa viivytys kohti ääretöntä. Menetelmä ei täten sovellu tilanteisiin, joissa käyttösuhte on lähellä yhtä tai ylittänyt sen. (Luttinen ym. 2005.)

Koordinaattimuunnosmenetelmä perustuu siihen, että suurilla käyttösuhteilla viivytys ei lähesty ääretöntä, vaan nestevirtausanalogian mukaista viivytystä ylikuormitusajan ollessa rajallinen. Koordinaattimuunnosmenetelmässä yhdistetään nestevirtausmallin ja stokastisen jonomallin mukaiset viiveet. (Luttinen ym. 2005.)

Kuvassa 7 on esitetty stationaarinen satunnaisviive (Random), aikasidonnainen viive (Transformed) ja deterministinen (Overflow) viive valo-ohjauksisessa liittymässä 5 minuutin kysyntähuipun aikana.



Kuva 7. Stationaarinen satunnaisviive (Random), muunnettu aikariippuvainen viive (Transformed) ja deterministinen viive (Overflow) valo-ohjauksisessa liittymässä (tarkastelu-aika 5 minuuttia, kiertoaika 100 s, vihreä aika 50 s ja välityskyky 1000 ajon/h) (Luttinen & Nevala 2002).

HCM:ssa palvelutasomittarina käytettävän ohjausviiveen lauseke on johdettu koordinaattimuutosmenetelmän avulla, ja se voidaan esittää muodossa:

$$W = W_N f_y + W_r + W_q, \quad (4)$$

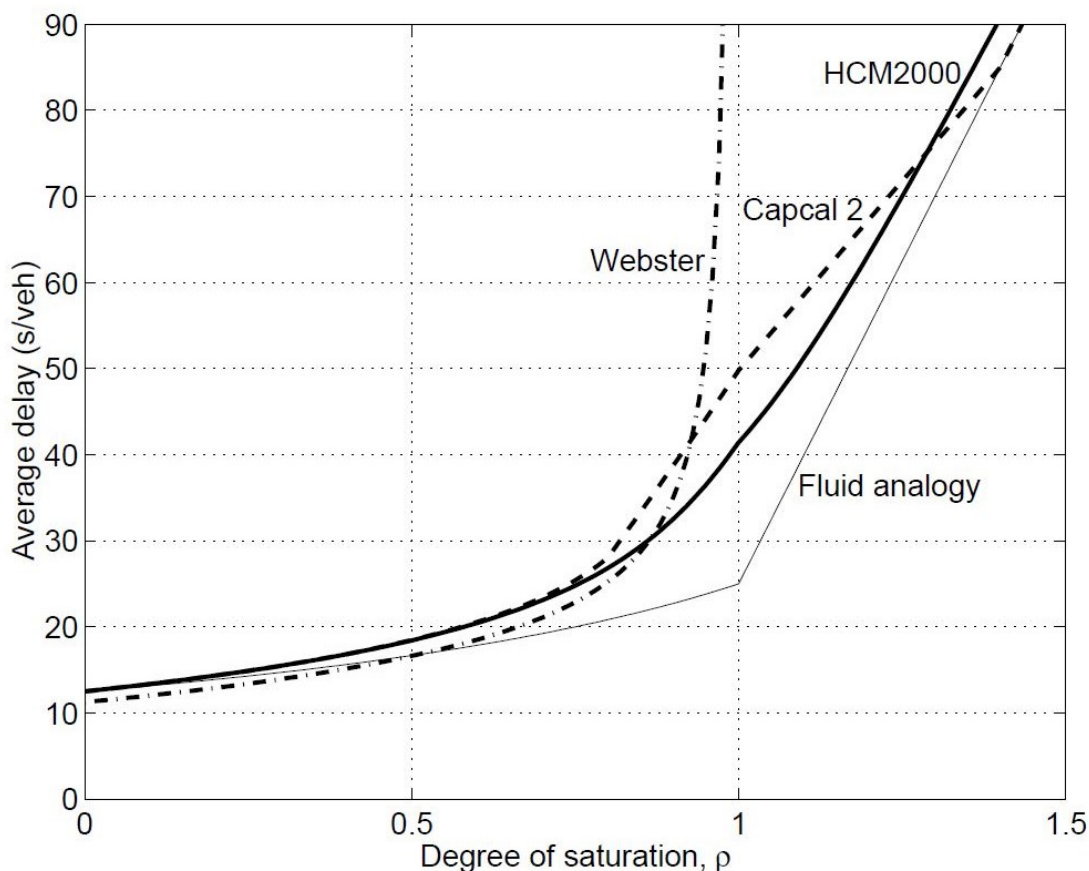
missä W_N on ohjausviive nestemäisessä liikennevirrassa ennen ylikuormitusta, f_y on yhteenkytkennästä aiheutuva korjauskerroin. W_r on satunnaisvaihtelusta ja lyhytaikaisesta ylikysynnästä aiheutuva lisäviive, ja W_q on tarkastelujakson alussa esiintyneestä jonosta aiheutuva lisäviive.

Capcalissa keskimääräinen viive määritetään liikenneviiveen (interaction delay) ja geometrisen viiveen summana. Geometrisen viive sisältää hidastamisesta ja kiihdyttämisestä aiheutuvan viiveen, joten liikenneviive voidaan tulkita pysähdysviiveeksi (stop delay). Liikenneviive on tällöin muotoa:

$$W_s = W_u + W_r, \quad (5)$$

missä W_u on säännöllinen viive (uniform delay) ja W_r satunnaisviive. Capcal ei käytä koordinaattimuutosmenetelmää, vaan käyttösuhteen välillä 0,8 ... 1,4 viiveen satunnaiskomponentti W_r arvioidaan interpoloimalla. Käyttösuhdetta 1,4 korkeammilla arvoilla käytetään determinististä mallia.

Kuvassa 8 on esitetty eri menetelmillä lasketut keskimääräiset ohjausviiveet liikennevalo-ohjauksisessa liittymässä.



Kuva 8. Eri menetelmien mukaiset viivytukset erillisohjatussa valo-ohjauksisessa liittymässä (tarkasteluaika 5 minuuttia, kiertoaika 100 s, vihreä aika 50 s ja välityskyky 1000 ajon/h) (Luttinen & Nevala 2002).

Kuvasta voidaan havaita mallien viivytysten vastaavan toisiaan alhaisilla käyttösuhteilla, kaavan 3 kertoimen 0,9 näkyessä pienillä käyttösuhteilla Websterin viiveiden 10 % muita menetelmiä pienempinä viiveinä. Kohtalaisilla käyttösuhteilla Capcal 2 ja HCM2000 antavat hieman Websteria suurempia viiveitä. Välityskyvyn käyttösuhteen lähestyessä yhtä Websterin lausekkeen mukainen viive kasvaa kohti ääretöntä, mutta Capcal 2:n ja HCM2000:n viiveet mukautuvat ylikuormitustilanteen tilapäisyyteen. Käyttösuhteen ollessa lähellä yhtä HCM:n koordinaattimuunnosmenetelmällä muodostettu malli tuottaa Capcalia alempia viiveitä. Käyttösuhteen lähestyessä ja ylittäessä 1,4:n tuottaa Capcalin interpolaatiomenetelmällä muodostettu malli HCM:a alempia viiveitä.

Nykyään yleistyneellä liikennetieto-ohjauksella voidaan pienentää valo-ohjauksesta aiheutuvia viivytyksiä. Liikennetieto-ohjauksen ja kyseiseen liikennetilanteeseen optimoidun aikaohjauksen laskennallisten viivytysten välinen ero on melko pieni, mutta suurin ero syntyy siitä, että liikennetieto-ohjaus mukautuu pieniinkin liikennetilanteiden muutoksiin. Todellinen liikennetilanne on harvoin täsmälleen sellainen, johon aikaohjaus on optimoitu. Liikennetieto-ohjauksisessa liittymässä viivytukset riippuvat liikennetieto-ohjauksen parametreista, joihin kuuluvat pidennysaika, minimivihreän pituus ja maksimivihreän pituus. (Luttinen ym. 2005, Rouphal ym. 2002.)

HCM:n menetelmässä liikennetieto-ohjauksen parametrit määritetään käyttämällä toteutuneita keskimääräisiä vihreän ajan ja kiertoajan pituuksia. Capcal puolestaan laskee korjauskertoimen, jolla optimaaliselle aikaohjaukselle lasketut viiveet muutetaan liikennetieto-ohjausta vastaaviksi. (Luttinen ym. 2005.)

2.4 IVAR-ohjelmiston nykyiset viivytysmallit

IVAR-ohjelmistossa nykyisin käytettävät liittymien viivytysmallit on määritetty diplomityössä "Liittymien viivytys- ja polttoaineenkulutusmallit" (Kari 1993) esitetyillä menetelmillä ja kaavoilla. Viivytysten laskennan perustana on käytetty ajotapojen osuus- ja odotusmalleja, jotka on muodostettu Capcal-ohjelmiston avulla tuntiliikenteistä laske-
tuista havainnoista. Ajoneuvojen ajotavat on jaettu kolmeen luokkaan perustuen niiden alhaisimpaan ajonopeuteen liittymässä:

- pysähtymään joutuvat ajoneuvot,
- hidastamaan joutuvat ajoneuvot, ja
- liittymän läpi viivytyksettä ajavat ajoneuvot.

Viivytyksille ei ole muodostettu suoraa mallia, vaan mallit on tehty eri ajotapojen osuuksille ja odotusajalle. Viivytysmalli koostuu ajotapamalleista, ajotapojen ajon aikaisista viivytyksistä ja odotusaikamallista. Liittymän aiheuttamat vuotuiset viivytykset muodostuvat tällöin eri ajotapojen ajon aikaisista viivytyksistä ja odotusajoista. (Kari 1993.)

Mallit on muodostettu ajamalla suuri määrä Capcal-ajoja eri tuntiliikennemäärillä, min-
kä jälkeen tulokset on yhdistetty vastaamaan vuositasa. Matemaattiset mallit on muo-
dostettu lineaarista regressioanalyysia käyttämällä. (Kari 1993.)

Liittymämallien määrittämisessä liittymiä on käsitelty pistemäisinä olettaen, että tielin-
jat ulottuvat liittymästä toiseen. Liittymän aiheuttamilla viivytyksillä tarkoitetaan tällöin
ajoneuvoille aiheutuvaa ajanhukkaa verrattuna tilanteeseen, jossa liittymää ei olisi. Mal-
lit on luotu kanavoimattomalle, kanavoidulle ja monikaistaiselle kolmi- ja nelihaaraliit-
tymälle. Yhteensä on siis tarkasteltu kuutta geometrialtaan erilaista tasoliittymää. Liit-
tymien ohjaustapoina on käytetty väistämisvelvollisuutta, pysähtymispakkoa ja valo-
ohjausta, jolloin tarkasteltavia liittymätyyppejä on yhteensä 18. (Kari 1993.)

Myöhemmin IVAR-ohjelmiston malleja on täydennetty kattamaan myös kierto- ja eri-
tasoliittymät (Kari 1997).

3 Simulointiohjelmiston valinta

3.1 Lähtökohdat

Lähtökohdaksi simulointiohjelmiston valinnalle otettiin Suomessa yleisesti käytössä olevat mikrosimulointiohjelmistot Paramics, Synchro/SimTraffic ja Vissim. Työssä käytettävän ohjelmiston valitsemiseksi kullakin ohjelmistolla mallinnettiin vastaava kanavoitu nelihaaraliittymä, joka simuloitiin ja tulosten perusteella kullakin ohjelmalla määritettiin keskimääräiset viivytykset saapumissuunnittain. Paramicsista käytettiin ohjelmiston versiota 6.8.0., Synchro/SimTrafficista versiota 7 ja Vissimista versiota 6.

3.2 Liittymän mallintaminen ja simuloinnit

Liittymät mallinnettiin seuraavia lähtötietoja käyttäen:

- Saapuvien linkkien pituus on 200 metriä.
- Sivusuunnissa on 100 metrin pituiset kääntymiskaistat vasemmalle.
- Kaistaleveys on 3,7 metriä.
- Nopeusrajoitus on pääsuunnilla 60 km/h ja sivusuunnilla 50 km/h.
- Raskaan liikenteen osuus on 10 %.
- Sivusuunnilla on väistämisvelvollisuus.

Ohjelmistojen kalibrointia ei suoritettu erikseen työn yhteydessä, vaan kunkin ohjelmiston mallit kalibroitiin suomalaisiin olosuhteisiin Tieliikenteen toimivuuden arviointi -ohjeessa (Liikennevirasto 2013b) suositelluin parametrein. Paramicsissa käytettiin seuraavia oletusarvoista poikkeavia parametreja:

- Time Steps: 6
- Speed Memory: 9
- Approach Visibility: 10 m
- Reaction Factor ja Headway Factor: 0,8.

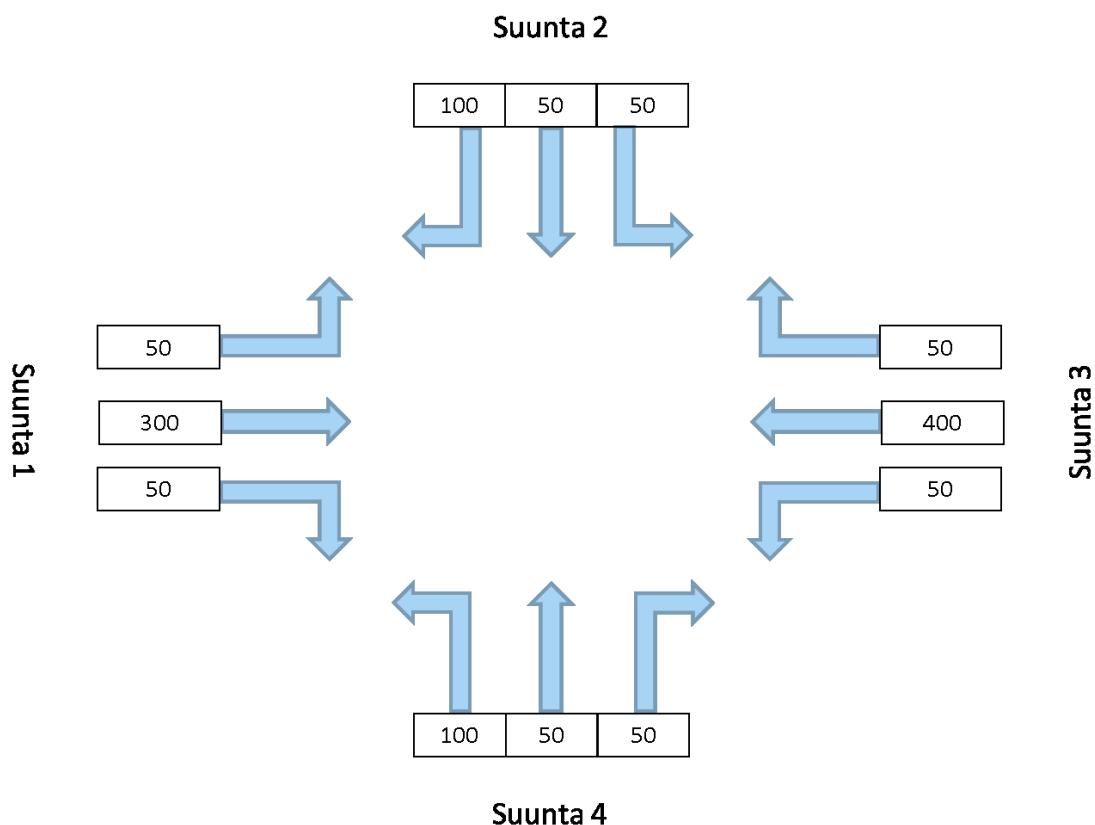
Synchro/SimTrafficissa käytettiin seuraavaa oletusarvoista poikkeavaa parametria:

- Vehicle Length: 6,5 m.

Vissimissa käytettiin seuraavia oletusarvoista poikkeavia parametreja:

- Average Standstill Distance: 1,9 m
- Additive Part of Safety Distance: 2,25 m
- Multiplic. Part of Safety Distance: 3,25 m
- Safety Distance Factor: 1,5 m
- Front ja Rear Gap: 0,5 m.

Kullekin mallille määritettiin kuvan 9 mukaiset liikennemäärät ja malleille suoritettiin kolme 60 minuutin mittaista simulointiajota eri siemenluvuilla. Kolme simulointiajota arvioitiin riittäväksi määräksi liikennemäärien ollessa suhteellisen pienet. Mallien koostuessa yksittäisestä liittymästä, simulointiajota ennen ei suoritettu erillistä lämmittelyjaksoa, vaan tulosten keruu aloitettiin heti simulointiajojen alusta.



Kuva 9. Simuloinneissa käytetyt liikennemäärät (ajoneuvoa/h).

Kaikista käytetyistä ohjelmista saadaan tulokset tekstimuotoisina raportteina, jotka voidaan tuoda Excel-taulukkoon.

Paramicsissa tulokset määritettiin Analyser-ohjelmalla, jonka Report Template -toiminnolla voidaan määrittää ohjelman tulostamat tulokset. Kääntyvien virtojen viivytykset määritetään Turn Delay -ominaisuudella. Turn Delay ottaa kuitenkin huomioon vain viivytyksen saapumislinkin pysäytysviivalta poistumislinkin pysäytysviivalle (Quadstone 2011, Quadstone 2014), jolloin uudelleen kiihdyttämisestä aiheutuva ohjausviiveen osuus jää tuloksissa huomioimatta. Tämän vuoksi tulosuuntien kääntyvät virrat määritettiin vielä omiksi reiteikseen Analyserin Routes -työkalua käyttämällä, ja kunkin kääntyvän virran keskimääräinen viivytys määritettiin Link Delay -raporttina näin muodostettujen reittien linkkien keskimääräisten viivytysten summana.

SimTrafficissa saapumissuunnittaiset viivytykset saadaan määritettyä Performance Report by movement -raporttina (Trafficware 2007).

Vissimissa viivytysten määrittämiseen on kaksi tapaa. Keskimääräinen viive voidaan määrittää minkä tahansa kahden verkolla sijaitsevan pisteen välillä, tai se voidaan mää-

rittää liittymälle kääntymissuunnittain. Saapumissuunnittaiset viivytykset määritettiin liittymäkohtaisen Node Results -raporttina (PTV 2013).

3.3 Simulointitulokset

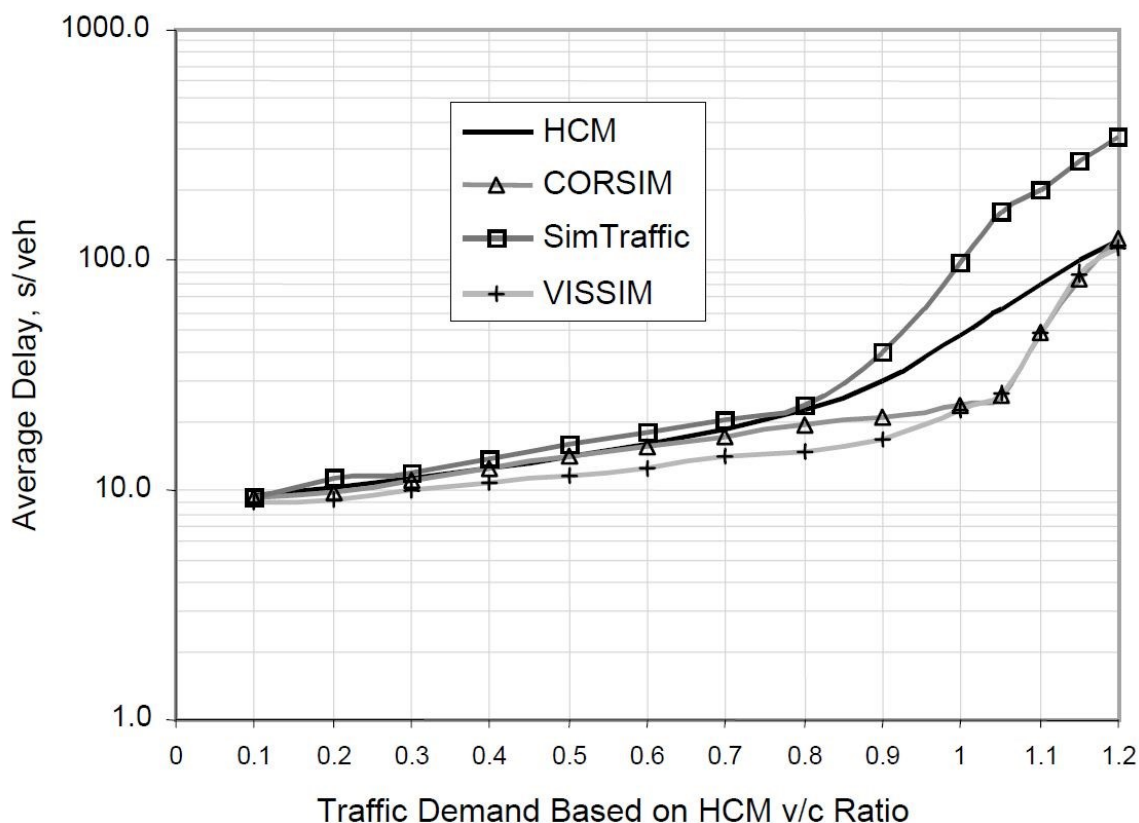
Simulointiajojen tuloksina saadut kääntyvien virtojen keskimääräiset viivytykset taulukoitiin Microsoft Excel -ohjelmalla. Viivytyksistä määritettiin keskimääräiset saapumissuunnittaiset viivytykset kääntyvien virtojen liikennemäärillä painotettuina keskiarvoina. Tuloksena saatujen viivytysten keskiarvot eri saapumissuunnille on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri simulointiohjelmistoilla määritetyt keskimääräiset viivytykset eri saapumissuunnille.

	Viivytys (s/ajon)			
	Paramics, Turn Delay	Paramics, Route Delay	SimTraffic	Vissim
Suunta 1	0,42	1,18	2,61	1,40
Suunta 2	12,78	14,78	17,00	4,00
Suunta 3	0,31	1,48	2,98	1,37
Suunta 4	11,03	12,62	18,01	5,43

Tuloksissa voidaan havaita vaihtelua eri ohjelmistoilla määritettyjen viiveiden välillä. Paramicsilla määritetyissä viivytyksissä näkyy kiihdytyksestä johtuvan viivytyksen puuttuminen Turn Delay -menetelmällä saadun viivytyksen pienempänä arvona verrattuna Route Delay -viiveeseen. Vissimilla määritetyt pääsuuntien viivytykset vastaavat suuruusluokaltaan Paramicsin Route Delay -viivytyksiä. Sivusuuntien viivytykset ovat sen sijaan huomattavan pienet. SimTraffic antaa muita ohjelmistoja suuremmat viivytykset sekä pää- että sivusuunnille.

Myös Tian ym. (2002) on havainnut Corsimille, SimTrafficille ja Vissimille suoritettua vertailussa SimTrafficin tuottavan muita ohjelmistoja suurempia viivytyksiä. Vissimin havaittiin puolestaan tuottavan ohjelmistoista pienimmät viivytykset (kuva 10). Kuvasta voidaan myös havaita eri menetelmillä määritettyjen viivytysten välisten erojen kasvavan voimakkaasti lähestyttäessä liittymän välityskykyä.



Kuva 10. Eri ohjelmistoilla määritetyt sekä HCM:lla lasketut keskimääräiset viivytykset (pystyasteikko logaritminen) (Tian ym. 2002).

Toisaalta Helelä (2010) on havainnut Vissimin avulla pysähtymispakolla ohjatulle sivusuunnalle määritettyjen viiveiden vastaavan varsin hyvin suomalaista vertailuaineistoa, mikä viittaisi siihen, että malli saattaa olla kalibroitu joiltain osin väärin. Mahdollinen syy mataliin viivytyksiin on liian suurten nopeustasojen (Reduced Speed Areas) käyttö kaarteissa. Tarkempaa tutkimusta asiasta ei kuitenkaan suoritettu tämän työn yhteydessä.

Paramics on todettu myös ominaisuuksiltaan soveltuvaksi valo-ohjauksisten liittymien ja kiertoliittymien viivytyksien vertailussa (Oketch ym. 2004).

Vertailun tulosten ja aiempien kokemusten perusteella työssä käytettäväksi simulointiohjelmistoksi valittiin Paramics. Viivytykset määritetään Route Delay -raportteina, jolloin ohjausviive tulee huomioiduksi kokonaisuudessaan. Tuloksena saadaan tällöin vapaan nopeuden ja toteutuneen nopeuden erotuksena määritetty, liittymän ohjaustavasta, geometriasta ja muusta liikenteestä koostuva kokonaisviive.

3.4 Paramics simulointiohjelmistona

Paramics-ohjelmisto koostuu useasta eri ohjelmasta, joita ovat Modeller, Analyser, Converter, Designer, Estimator ja Processor. Tässä työssä ohjelmista käytettiin Modelleria ja Analyseria. Modeller-ohjelmalla mallinnetaan mikrotasoiset liikenneverkot ja suoritetaan simuloinnit. Simulointia voidaan myös seurata animaationa sen edetessä. Analyser-ohjelmalla voidaan analysoida simulointien tuottamaa dataa. Tuloksia saadaan sekä tekstimuotoisina raportteina että graafisina esityksinä.

Paramics eroaa muista mikrosimulointiohjelmistoista siinä, että se perustuu rinnakkaisprosessointiin. Tämän vuoksi se pystyy samanaikaisesti mallintamaan muita ohjelmistoja enemmän teitä ja ajoneuvoja. Rinnakkaisprosessoinnin vuoksi sillä on myös tarkka häiriöiden muodostumisen mallinnuskyky. (Kosonen 2000.)

Paramics perustuu liikenneverkon kuvaamiseen linkkeinä ja solmuina. Linkkejä ovat esimerkiksi linjaosuudet ja rampit, solmuja puolestaan liittymät ja kohdat, joissa tien kaistamäärä muuttuu. Linkkielementeille määritellään mm. pituus, leveys, kaistamäärä ja nopeusrajoitus. Solmuelementeille määritellään mm. etuajo-oikeusjärjestelyt, kääntymiskaistat ja mahdolliset liikennevalojen ohjausperiaatteet.

Paramicsin parametrit voidaan karkeasti jakaa koko mallia koskeviin simulointiasetuksiin ja yksittäisiä mallin elementtejä koskeviin parametreihin. Malleissa käytettiin Tieliikenteen toimivuuden arviointi -ohjeessa (Liikennevirasto 2013b) suositeltuja parametriervoja.

Tässä työssä käytetään ohjelmiston versiota 6.8.0.

4 Viivytysmallien muodostaminen

4.1 Yleistä

Liittymien viivytysten laskentamalleja laadittaessa kutakin tulosuuntaa tarkastellaan erillisenä, jolloin viivytysmallit saadaan muodostettua pää- ja sivusuunnille erikseen. Käsiteltävät liittymätyypit kattavat valo-ohjauksettomat ja valo-ohjauksiset liittymät, kiertoliittymät sekä muutamia erilaisia eritasoliittymiä. Mallit laaditaan siten, että ne ovat yhdistettävissä IVAR-ohjelmiston tietorakenteeseen ja muihin malleihin (muun muassa polttoaineenkulutus- ja päästömallit).

4.2 Liittymätyypit

Työssä tarkasteltavat liittymätyypit ovat kanavoimaton (ei omia kaistoja tulosuuntien eri liikennevirroille), kanavoitu (pääsuunnassa vasemmalle kääntyville omat kaistat) kolmi- ja nelihaaraiset liittymät sekä kolmi- ja nelihaaraiset kiertoliittymät. Lisäksi on tarkasteltu porrastettua liittymää sekä kolmea eritasoliittymää. Eritasoliittymätyyppeinä ovat yksiramppinen eritasoliittymä sekä eritasoliittymät silmukka- ja rombisilla rampeilla. Kanavoitujen liittymien ohjaustapoina on tarkasteltu väistämisvelvollisuutta, pysähtymispakkoa ja valo-ohjausta.

4.3 Simuloinnit

4.3.1 Liittymämallit

Kukin liittymätyyppi mallinnettiin Paramicsin Modeller-ohjelmalla. Tasoliittymätyypit koostuvat 200 metrin pituisista, toisiaan vastaan kohtisuorista linkeistä. Liittymien mallintamisessa käytettiin Tasoliittymät-ohjetta (Tiehallinto 2001). Eritasoliittymät mallinnettiin Perusverkon eritasoliittymät -ohjetta (Tiehallinto 2006) soveltaen. Tasoliittymät mallinnettiin 0-tasauksella, eritasoliittymissä sivusuunta ylittää pääsuunnan 6 metrin korkeudella 0-tasosta.

- Saapuvien linkkien pituus on 200 metriä.
- Sivusuunnissa on 100 metrin pituiset kääntymiskaistat vasemmalle.
- Kaistaleveys on 3,7 metriä.
- Nopeusrajoitus on pääsuunnilla 60 km/h ja sivusuunnilla 50 km/h.
- Raskaan liikenteen osuus on 10 %.

Valo-ohjauksisissa liittymissä käytetään liikennetieto-ohjattuja valo-ohjelmia, jolloin ohjelman kiertoaika ja vaiheiden pituudet eivät ole ennalta määrättyjä. Ohjelmissa eri vaiheiden pituudet määräytyvät ilmaisimilta saatavien liikennetietojen perusteella, jolloin eri liikennemäärillä voitiin käyttää samoja ohjelmia.

Saapuvien ajoneuvojen tunnistamiseksi sijoitettiin läsnäoloilmaisimet kaistoittain pysäytysviivoille ja pidennysilmaisimet 100 metrin päähän pysäytysviivoista.

Vaihejaot suunniteltiin Liikennevalojen suunnittelu -ohjeen (Tiehallinto 2005) normaaliosuhteisiin suositeltujen vaihejakojen pohjalta työssä käytetyillä liikennemäärillä toimiviksi seuraavin parametrein:

- Nelihaaraliittymissä pääsuunnan minimivihreä on suoraan ajaville ja oikealle kääntyville on 10 sekuntia ja maksimivihreä 30 sekuntia. Vasemmalle kääntyville minimivihreä on 2 sekuntia ja maksimivihreä 10 sekuntia. Sivusuunnalle minimivihreä on 5 sekuntia ja maksimivihreä 30 sekuntia.
- Kolmihaaraliittymässä pääsuunnan minimivihreä on 20 sekuntia ja maksimivihreä 40 sekuntia. Sivusuunnan minimivihreä on 5 sekuntia ja maksimivihreä 35 sekuntia. Pääsuunnalla on lisäksi liikenneohjattu jälkivihreä, jotta vasemmalle kääntyvä liikenne ei tuki suoraan menevää kaistaa.
- Keltaisen vaiheen pituus on pääsuunnalla 5 sekuntia ja sivusuunnalla 3 sekuntia.

Porrastettuna liittymänä käytettiin vasen-oikea-porrastusta. Liittymä mallinnettiin luomalla kaksi kanavoimatonta kolmihaaraista liittymää 50 metrin etäisyydelle toisistaan.

Yksiramppisessa eritasoliittymässä pää- ja sivusuunnan välillä on yksi kaksikaistainen ramppi, joka liittyy pääsuuntaan kanavoidulla kolmihaaraliittymällä ja sivusuuntaan kanavoimattomalla kolmihaaraliittymällä.

Silmukkarampillisessa eritasoliittymässä on silmukkarampit, jotka liittyvät pääsuuntaan suuntaisliittymällä ja sivusuuntaan kanavoimattomalla kolmihaaraliittymällä. Pääsuuntien suuntaisliittymissä on 70 metrin pituiset erkanemiskaistat ja 130 metrin pituiset liittymiskaistat.

Eritasoliittymässä rombisilla rampeilla on suorat yksisuuntaiset rampit sekä pää- että sivusuunnalle. Pääsuunnalta erkanevilla rampeilla on 70 metrin pituiset erkanemiskaistat ja pääsuunnalle liittyvillä rampeilla 130 metrin pituiset liittymiskaistat. Sivusuunnalle rampit liittyvät kanavoimattomilla liittymillä.

Mallit kalibroitiin vastaamaan suomalaisia olosuhteita seuraavilla Tieliikenteen toimivuuden arviointi -ohjeen (Liikennevirasto 2013b) mukaisilla parametreilla:

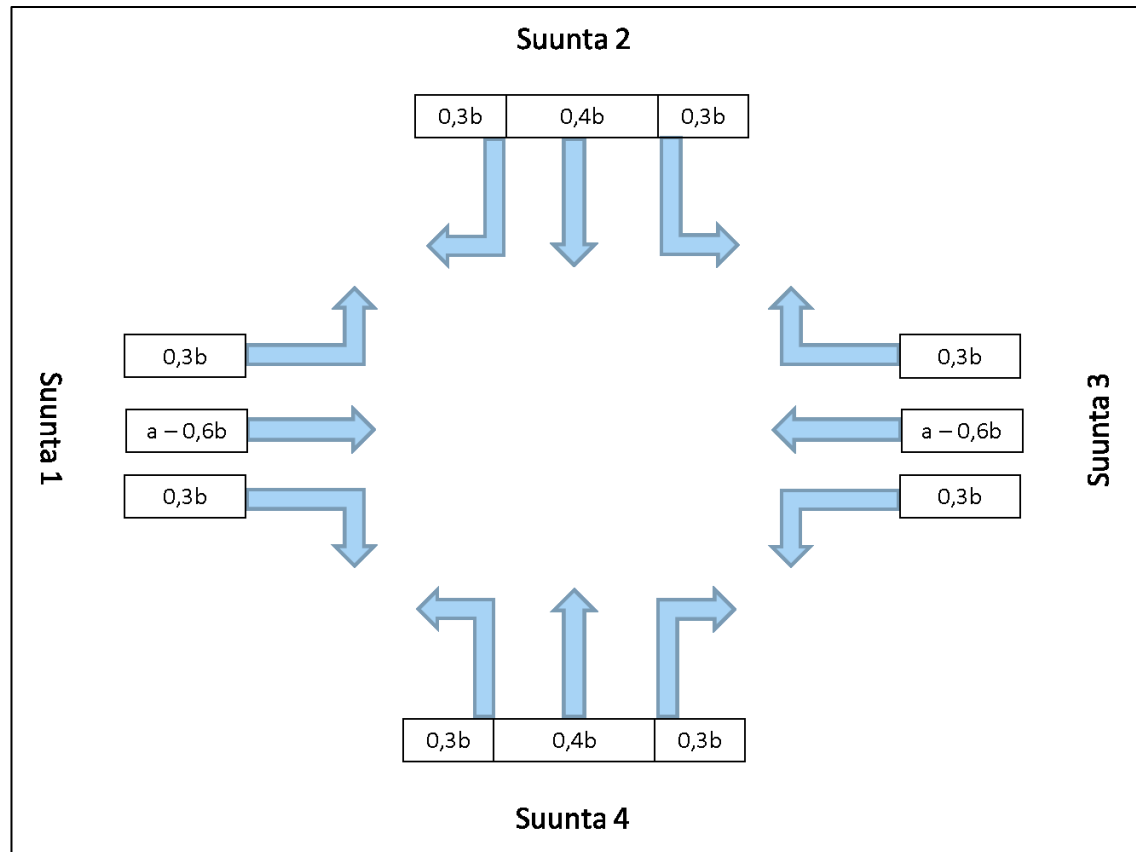
- Time Steps: 6
- Speed Memory: 9
- Approach Visibility: 10 m
- Reaction Factor ja Headway Factor
 - kiertoliittymissä: 0,7
 - valo-ohjauksisissa liittymissä: 0,77
 - valo-ohjauksettomissa liittymissä: 0,8.

Muiden parametrien osalta käytettiin niiden oletusarvoja.

4.3.2 Liikennemäärät

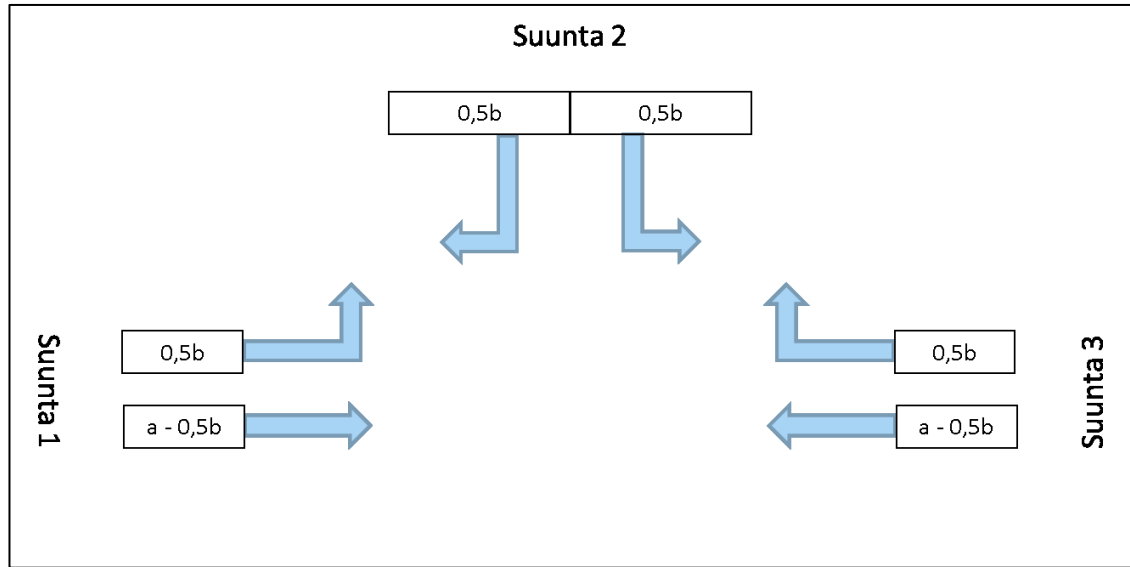
Koska IVARissa on käytettävissä vain keskivuorokausiliikennetasoisia (KVL-) tietoja, eikä esimerkiksi liikenteen suuntajakaumaa ja kääntyvien virtojen suhteita tunneta, käytettiin työssä niiden osalta oletuksia. Suuntajakaumaksi oletettiin 50/50. Neliharaliittymissä sivusuunnan liikenteestä 40 % oletettiin jatkavan liittymästä suoraan, 30 %

kääntyvän vasemmalle ja 30 % oikealle. Pääsuunnasta oletettiin kääntyvän vastaava määrä liikennettä sivusuunnalle, kuin sivusuunnalta pääsuunnalle. Saapumissuunnat numeroitiin myötäpäivään vasemmasta tulohaarasta alkaen. Suunnat 1 ja 3 ovat tällöin pääsuuntia, ja suunnat 2 ja 4 sivusuuntia. Kääntyvien virtojen keskinäiset suhteet on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Kääntyvien virtojen keskinäiset suhteet nelihaaraliittymissä (a = pääsuunnan saapuvan liikenteen määrä, b = sivusuunnan saapuvan liikenteen määrä).

Kolmihaaraliittymissä sivusuunnan liikenteen oletettiin puolestaan jakautuvan tasaisesti molemmille pääsuunnille. Pääsuunnasta oletettiin kääntyvän vastaava määrä liikennettä sivusuunnalle. Kääntyvien virtojen keskinäiset suhteet on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Kääntyvien virtojen keskinäiset suhteet kolmihaaraliittymissä (a = pääsuunnan saapuvan liikenteen määrä, b = sivusuunnan saapuvan liikenteen määrä).

Liikennemäärien lähtökohdaksi otettiin kolme eri keskivuorokausiliikenteen tasoa (2000, 4000, 10000), kolme eri tuntiliikenteen tasoa (5%, 10% ja 15% KVL:stä) ja neljä eri sivusuunnan liikennemäärää (5%, 10%, 20% ja 40% pääsuunnan saapuvasta liikenteestä). Kattavamman otoksen saamiseksi tuntiliikennemääriä tarkistettiin neljän ensimmäiseksi simuloidun liittymätyypin jälkeen seuraaviksi: 10% ja 15% (2000 ja 4000) sekä 8%, 10%, 12% ja 15% (10000). Simuloinneissa käytetyt liikennemäärät on esitetty liitteissä 1 ja 2.

Oletuksien pohjalta muodostettiin kutakin pää- ja sivusuuntien tuntiliikennemäärien yhdistelmää vastaavat matriisit, joiden perusteella Paramicsiin muodostettiin kääntyviä virtoja vastaavat lähtöpaikka-määränpää -matriisit. Taulukossa 3 on esitetty esimerkki matriisista.

Taulukko 3. Kääntyvät virrat pääsuunnan liikennemäärän ollessa 1000 ajon/h ja sivusuunnan liikennemäärän ollessa 100 ajon/h.

	To 1	To 2	To 3	To 4	Total
From 1	0	15	470	15	500
From 2	15	0	15	20	50
From 3	470	15	0	15	500
From 4	15	20	15	0	50
Total	500	50	500	50	1100

4.3.3 Simulointiajot ja tulosten määrittäminen

Jokainen liittymätyyppi simuloitiin kullakin pää- ja sivusuunnan liikennemäärien yhdistelmällä. Simulointiajon pituutena käytettiin 60 minuuttia ja simuloinnit suoritettiin kolmeen kertaan eri siemenlukuja käyttäen. Simulointiajojen määräksi valittiin kolme työmäärän pitämiseksi kohtuullisena. Mallien koostuessa yksittäisestä liittymästä, simulointiajoja ennen ei suoritettu erillistä lämmittelyjaksoa, vaan tulosten keruu aloitettiin heti simulointiajojen alusta.

Tulosten määrittämiseksi jokaisen tulosuunnan kääntyvät virrat määritettiin omiksi reiteikseen Analyserin route-työkalua käyttämällä. Kunkin kääntyvän virran keskimääräi-

nen viivytys saatiin määritettyä Link Delay -raporttina näin muodostettujen reittien linkkien keskimääräisten viivytysten summana.

Jokaisen simulointiajon tuloksena saatiin näin ollen raporttimuotoinen esitys kunkin kääntyvän virran keskimääräisestä viivytyksestä. Saaduista viivytyksistä laskettiin keskimääräisten kääntyvien virtojen liikennemäärillä painotetut keskiarvot. Näin saadut tulosuuntien keskimääräiset viivytykset taulukoitiin liittymätyypeittäin Microsoft Excel -ohjelmalla siten, että jokaista pää- ja sivusuunnan liikennemäärien yhdistelmää vastaa kolme eri simulointiajojen tuloksena saatua viivytystä.

Viivytysmalleja muodostettaessa taulukoista poistettiin niiden ajojen tulokset, joissa liittymän välityskyky ylittyi ja tulokset ovat näin ollen epäluotettavia. Tämä on myös otettava huomioon malleja luotaessa ja niitä käytettäessä, sillä mallit toimivat luotettavasti vain niillä liikennemäärien tasoilla, joilla ne on luotu.

Kolmihaaraliittymissä pääsuunnan keskimääräiseen viivytykseen vaikuttaa voimakkaasti se, käännytäänkö pääsuunnalta oikealle vai vasemmalle. Vasemmalle kääntyvät joutuvat väistämään vastakkaisen suunnan liikennettä, mikä lisää suunnasta 1 saapuvien keskimääräistä viivytystä suunnasta 3 saapuviin verrattuna. Tästä syystä viivytysmallit luotiin aluksi molemmille pääsuunnille erikseen, minkä jälkeen ne yhdistettiin kuvaamaan pääsuunnan keskimääräistä viivytystä.

4.4 Matemaattiset mallit

Matemaattiset viivytysmallit muodostettiin lineaarista regressioanalyysia käyttäen. Lineaarisen regression avulla voidaan estimoida kertoimet lineaariselle, yhdestä tai useammasta riippumattomasta muuttujasta koostuvalle yhtälölle, joka kuvaa parhaiten selitettävää muuttujaa. Lineaarisen regression tuloksena saatava funktio on muotoa:

$$y = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_pX_p + E, \quad (6)$$

missä X_1, X_2, \dots, X_p ovat selittäviä muuttujia
 b_0, b_1, \dots, b_p ovat estimoitavat regressiokertoimet
 E on mallin residuaali.

Regressioanalyysi on monipuolinen ja joustava menetelmä muuttujien välisten kausaalisuhteiden tutkimiseen. Sen erityinen etu on, että siinä voidaan tutkia yhtä aikaa monen selittävän muuttujan vaikutusta selitettävään muuttujaan. Regressioanalyysi perustuu lineaarisuusoletukseen, toisin sanoen sen avulla voidaan tutkia muuttujien välisiä lineaarisia eli suoraviivaisia kausaalisuhteita. Sopivien muunnosten avulla se soveltuu kuitenkin myös epälineaaristen suhteiden kuvaamiseen. Epälineaarisuuksia voidaan korjata esimerkiksi logaritmi- tai neliömuunnoksilla. Logaritmimuunnoksessa regressioanalyysi tehdään alkuperäisen x-muuttujan sijasta sen logaritmille, ja neliömuunnoksessa regressioanalyysia varten luodaan uusi muuttuja, joka saa arvoksi x-muuttujan neliön, ja lisätään se alkuperäisen muuttujan lisäksi regressionanalyysiin selittävänä muuttujana.

5 Tulokset

5.1 Regressioanalyysien tulokset

Regressioanalyysit tehtiin IBM SPSS Statistics -ohjelmalla. Simulointidatasta tehdyt taulukot tuotiin ohjelmaan, ja niihin luotiin epälineaaristen suhteiden analysoimista varten pää- ja sivusuunnan liikennemäärien lisäksi muuttujat, jotka saivat arvoikseen liikennemäärien neliöt, sekä muuttuja, joka sai arvokseen pää- ja sivusuunnan liikennemäärien tulon.

Kustakin liittymätyypistä muodostetuille taulukoille suoritettiin kaksi lineaarista regressioanalyysia, joista toisessa selitettävänä tekijänä oli pääsuuntien keskimääräisten viivytysten keskiarvo ja toisessa vastaavasti sivusuuntien keskimääräisten viivytysten keskiarvo. Molemmissa tapauksissa selittäviksi tekijöiksi valittiin pää- ja sivusuuntien liikennemäärät (ps ja ss) ja niiden neliöt jaettuna tuhannella (ps² ja ss²) sekä tulo jaettuna tuhannella (psss).

Regression tuloksena saatava funktio on tällöin muotoa:

$$y = x_0 + x_1ps + x_2ss + x_3ps^2 + x_4ss^2 + x_5psss, \quad (7)$$

missä ps = pääsuunnan liikennemäärä (ajoneuvoa/tunti)
 ss = sivusuunnan liikennemäärä (ajoneuvoa/tunti)
 ps² = pääsuunnan liikennemäärän neliö jaettuna tuhannella (ajon/h/1000)
 ss² = sivusuunnan liikennemäärän neliö jaettuna tuhannella (ajon/h/1000)
 psss = pää- ja sivusuunnan liikennemäärien tulo jaettuna tuhannella (ajon/h/1000)
 x₀ = regression tuloksena saatu liittymätyyppikohtainen vakiotermi
 x₁ ... x₅ = regression tuloksena saadut liittymätyyppikohtaiset kertoimet.

Tilanteissa, joissa neliömuotoisella funktiolla avulla ei saatu loogisesti toimivaa ja tilastollisesti merkitsevää mallia, käytettiin seuraavan muotoista eksponenttifunktiota:

$$y = x_0 * e^{x_1ps + x_2ss}. \quad (8)$$

Yhtälön linearisoimiseksi käytettiin regressioanalyysissa selitettävänä muuttujana y:n luonnollista logaritmia, jolloin yhtälö voidaan kirjoittaa puolittain muotoon:

$$\ln y = \ln x_0 + x_1ps + x_2ss. \quad (9)$$

Kertoimien estimoimisen jälkeen yhtälö saadaan palautettua takaisin epälineaariseen muotoon korottamalla sen molemmat puolet luonnollisen luvun e potenssiin. Tällöin saadaan yhtälö, joka on muotoa:

$$\begin{aligned} y &= e^{\ln x_0 + x_1ps + x_2ss} \\ &= x_0 e^{x_1ps + x_2ss}, \end{aligned} \quad (10)$$

missä ps = pääsuunnan liikennemäärä (ajoneuvoa/tunti)
 ss = sivusuunnan liikennemäärä yksikössä (ajoneuvoa/tunti)

x_0 = regression tuloksena saatu liittymätyyppikohtainen vakiotermi
 $x_1 \dots x_2$ = regression tuloksena saadut liittymätyyppikohtaiset kertoimet.

Regressiomallin kertoimet saadaan SPSS:n tulostamasta Coefficients-tilusta. Taulukossa 4 on esitetty esimerkkinä valo-ohjauksisen liittymän pääsuunnalle estimoidut kertoimet.

Taulukko 4. Valo-ohjauksisen liittymän pääsuunnan Coefficients-tilukko.

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	2,730	,401		6,807	,000
ps	-,004	,001	-,237	-2,678	,008
ss	,052	,003	1,065	19,166	,000
ps2	,004	,001	,425	4,909	,000
ss2	-,020	,005	-,228	-4,332	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

Estimoidut regressiokertoimet luetaan sarakkeelta B. Beta-sarakkeelta luetaan standardisoidut regressiokertoimet, joiden avulla voidaan päätellä muuttujien suhteellinen selitysvaiva. Itseisarvoltaan suurimmat arvot vaikuttavat selitettävään voimakkaavimmin. Sarakkeilta t ja Sig. luetaan kutakin kerrointa kohden tehdyn t-testin tulokset. Testissä testataan kertoimen tilastollista merkitsevyyttä nolalahypoteesilla, että kerroin on 0. Jos t-testin p-arvo on merkitsevyystasoa pienempi, voidaan nolalahypoteesi hylätä ja todeta muuttuja tilastollisesti merkitseväksi. Työssä käytettiin merkitsevyystasoa 0,050. Nolalahypoteesin jäädessä voimaan voidaan muuttuja jättää mallista pois, ellei ole sen mallissa pitämiseksi ole painavia käytännöllisiä syitä.

Malleissa käytettävien muuttujien valinta suoritettiin askeltavalla menetelmällä siten, että aluksi malliin otettiin selittäviksi tekijöiksi kaikki kaavan X muuttujat. Mikäli regression tuloksena saadussa mallissa oli kertoimia, joiden merkitsevyys alitti merkitsevyystason, poistettiin seuraavasta mallista huonoiten selitettävän muuttujan vaihtelua kuvaava muuttuja. Näin jatkettiin kunnes mallissa oli vain muuttujia, jotka merkitsevästi selittivät selitettävän muuttujan vaihtelua. Pää- ja sivusuuntien liikennemäärien tulon käyttämisen muuttujana havaittiin aiheuttavan useassa mallissa kolineaarisuutta, joka aiheutti epäloogisuutta mallien toimintaan. Tällaisissa tapauksissa kyseinen muuttuja jätettiin mallista pois.

B-sarakkeelta luetaan standardisoimattomat estimoidut regressiokertoimet. Valo-ohjauksisen liittymän pääsuunnan regressioyhtälö voidaan siis kirjoittaa muotoon:

$$y = 2,730 - 0,004 * ps + 0,052 * ss + 0,004 * ps^2 - 0,020 * ss^2, \quad (11)$$

missä
 ps = pääsuunnan liikennemäärä (ajoneuvoa/tunti)
 ss = sivusuunnan liikennemäärä (ajoneuvoa/tunti)
 ps^2 = pääsuunnan liikennemäärän neliö jaettuna tuhannella (ajon/h/1000)
 ss^2 = sivusuunnan liikennemäärän neliö jaettuna tuhannella (ajon/h/1000).

Koko mallin tilastollista merkitsevyyttä testataan F-testillä, joka kertoo pystytäänkö käytettävillä muuttujilla selittämään selitettävän muuttujan vaihtelua. F-testin tulokset luetaan ANOVA-tilusta (taulukko 5).

Taulukko 5. Valo-ohjauksisen liittymän pääsuunnan ANOVA-tila.

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	6389,705	4	1597,426	845,564	,000 ^b
	Residual	307,937	163	1,889		
	Total	6697,642	167			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Predictors: (Constant), ss2, ps, ss, ps2

P-arvo (Sig.) kertoo F-testin tilastollisen merkitsevyyden. P-arvon ollessa merkitsevyystasoa pienempi, malli on tilastollisesti merkitsevä.

Mallin hyvyttä tarkastellaan selitysasteen avulla. Mallin selitysaste saadaan Model Summary -tilusta (taulukko 6).

Taulukko 6. Valo-ohjauksisen liittymän pääsuunnan Model Summary -tila.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,977 ^a	,954	,953	1,374476

a. Predictors: (Constant), ss2, ps, ss, ps2

Selitysaste luetaan R Square -sarakeelta. Selitysaste kertoo kuinka suuren osuuden selitettävän muuttujan vaihtelusta regressioanalyysin selittävät muuttujat pystyvät selittämään. Kerroin vaihtelee nollan ja yhden välillä, arvon ollessa 1 malli selittää muuttujan vaihtelun täydellisesti.

Kolmihaaraliittymille regressioanalyysit tehtiin molemmille pääsuunnille erikseen. Viivytysmallin kertoimet määritettiin keskiarvoina regressioanalyysien tuloksina saaduista kertoimista.

Regressioanalyysien tuloksena saadut liittymätyyppikohtaiset kertoimet pääsuunnille on esitetty taulukossa 7 ja sivusuunnille taulukossa 8. Mikäli muuttuja on osoittautunut tilastollisesti ei-merkitseväksi, on sen kertoimeksi merkitty nolla. Regressioanalyysien tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteissä 3-5.

Taulukko 7. Pääsuuntien kertoimet liittymätyypeittäin.

Liittymätyyppi	Pääsuunnan kertoimet						Huom
	(Constant)	ps	ss	ps2	ss2	psss	
4-h, kanavoima- ton	0	0	0,004095	-0,00013	0,00563	0	
4-h, kanavoitu	0	-0,00046	0,007685	0,000682	0,007324	-0,0057	
4-h, valo- ohjauksinen	2,730115	-0,00353	0,051631	0,003626	-0,02008	0	
4-h, kierto	8,261751	0	-0,00578	0,001575	0,03152	0	
4-h, porrastettu	0	0	0	0,000355	0,034729	0	
4-h, stop	0	0,000361	0,005993	-0,00049	-0,00241	0	
4-h, eritaso 1ramp	0	0,000938	0,010763	-0,00089	0	0	
4-h, eritaso 2ramp	0	0,000373	0,008018	-0,00052	-0,00496	0	
4-h, eritaso romb	0	0,003626	0,002242	-0,00197	0	0	
3-h, kanavoima- ton	0	0,000914	-0,00098	-0,00037	0,012204	0	Keskiarvo suuntien 1 & 3 kertoimista
3-h, kanavoitu	0	0	0,006552	-0,00052	-8E-05	0	Keskiarvo suuntien 1 & 3 kertoimista
3-h, valo- ohjauksinen	3,763547	-0,00307	0,024877	0,002141	0,007264	0	Keskiarvo suuntien 1 & 3 kertoimista
3-h, kierto	7,489451	0	-0,00431	0,001681	0,011189	0	Keskiarvo suuntien 1 & 3 kertoimista

Taulukko 8. Sivusuuntien kertoimet neliöfunktioille liittymätyypeittäin.

Liittymätyyppi	Sivusuunnan kertoimet						Huom
	(Constant)	ps	ss	ps2	ss2	psss	
4-h, kanavoima- ton	0	0,002463	-0,01032	0,002306	0,063341	0	Käytetään ekspon- nenttifunktioita
4-h, kanavoitu	0	-0,00246	0	0,009066	0,071057	0	Käytetään ekspon- nenttifunktioita
4-h, valo- ohjauksinen	11,52592	0	-0,01813	0,004788	0,246094	0	
4-h, kierto	5,52906	0	-0,01089	0,001979	0,043485	0	
4-h, porrastettu	0	0	-0,07984	0,015244	0,371593	0	Käytetään ekspon- nenttifunktioita
4-h, stop	0	0	0	0,008081	0	0,06503	Käytetään ekspon- nenttifunktioita
4-h, eritaso 1ramp	0	0	0	0,007653	0,079757	0	Käytetään ekspon- nenttifunktioita
4-h, eritaso 2ramp	0	0,006587	0	-0,00339	0,003647	0	
4-h, eritaso romb	0	0,001199	0	-0,00063	0	0	
3-h, kanavoima- ton	0	0	0	0,009435	0,032479	0	Käytetään ekspon- nenttifunktioita
3-h, kanavoitu	0	0	0,018753	0,00957	0	0	Käytetään ekspon- nenttifunktioita
3-h, valo- ohjauksinen	13,66544	0	0,013801	0,00298	0,016562	0	
3-h, kierto	3,948863	0	-0,00335	0,001452	0,006491	0	

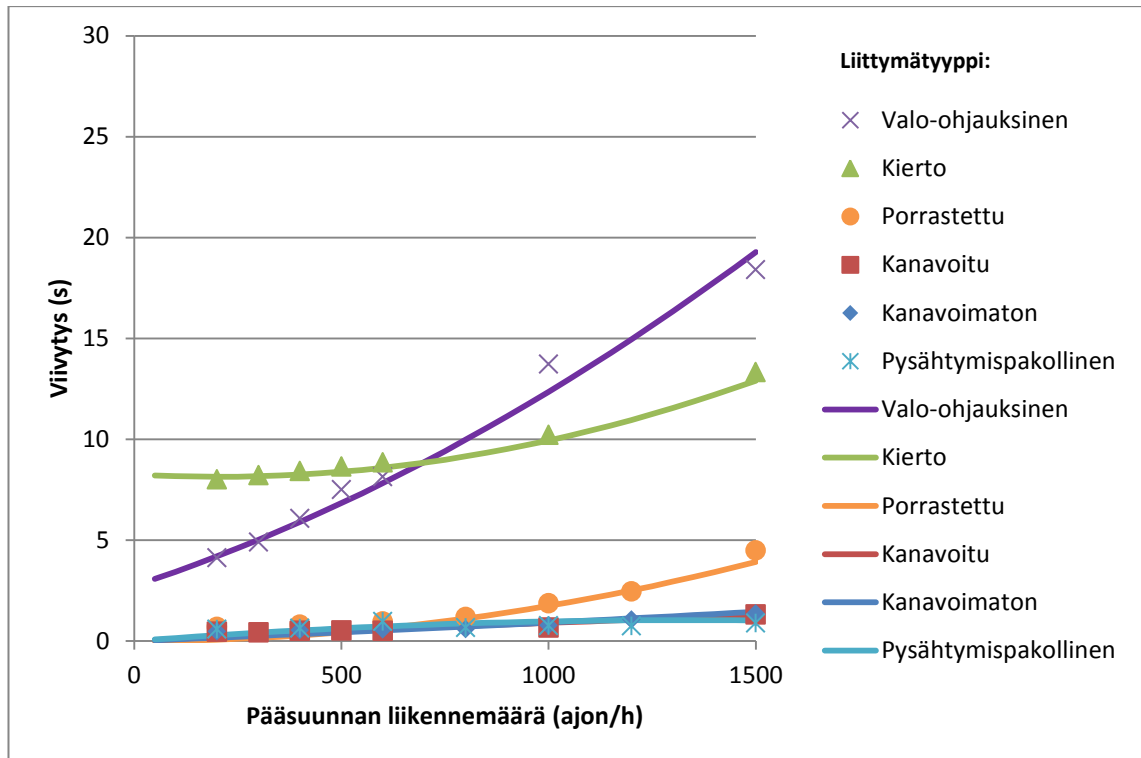
Mikäli regressionanalyysin tuloksena ei saatu neliömuutoksen avulla tilastollisesti merkitsevää ja loogisesti käyttäytyvää mallia, suoritettiin uusi regressioanalyysi logaritmi-muutosta käyttämällä. Niiden tuloksena saadut kertoimet on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Sivusuuntien kertoimet eksponenttifunktioille liittymätyypeittäin.

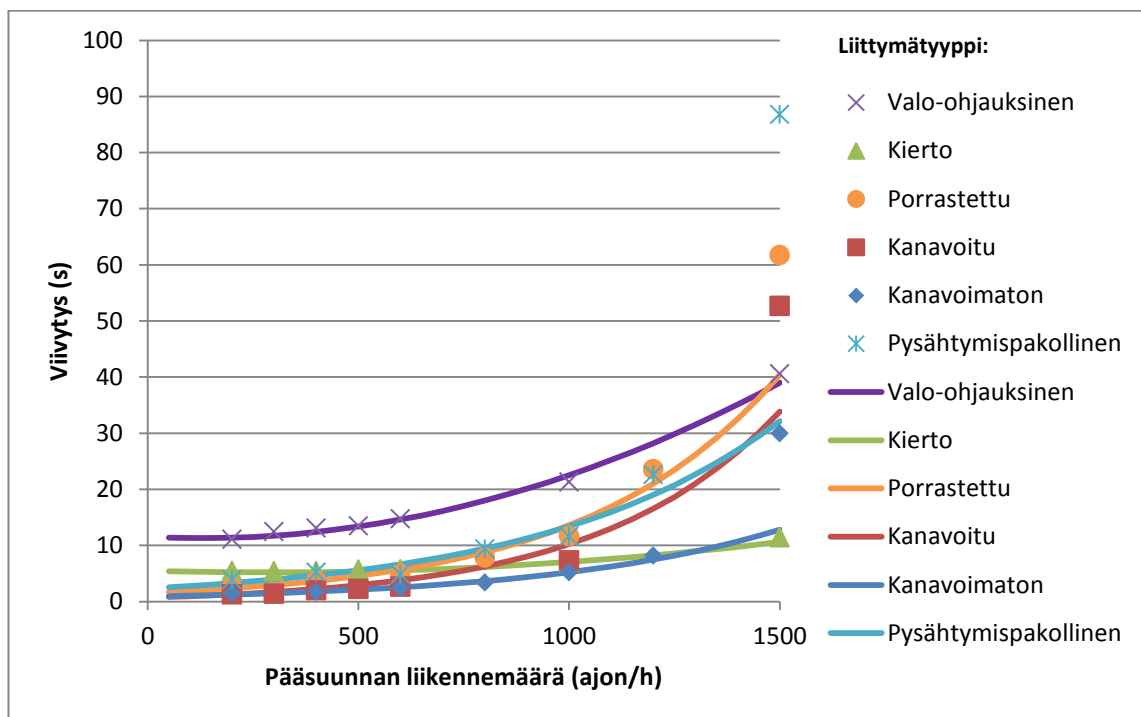
Liittymätyyppi	Sivusuunnan kertoimet			Huom
	(Constant)	ps	ss	
4-haara, kana-voimaton	0,876	0,001	0,002	
4-haara, kanavoi-tu	0,737	0,002	0,003	
4-haara, porras-tettu	1,543	0,002	0,003	
4-h, stop	2,336	0,001	0,003	
4-h, eritaso 1-ramppinen	2,002	0,001	0,002	
3-haara, kana-voimaton	0,724	0,002	0,003	
3-haara, kanavoi-tu	0,779	0,002	0,002	

5.2 Viivytysmallit

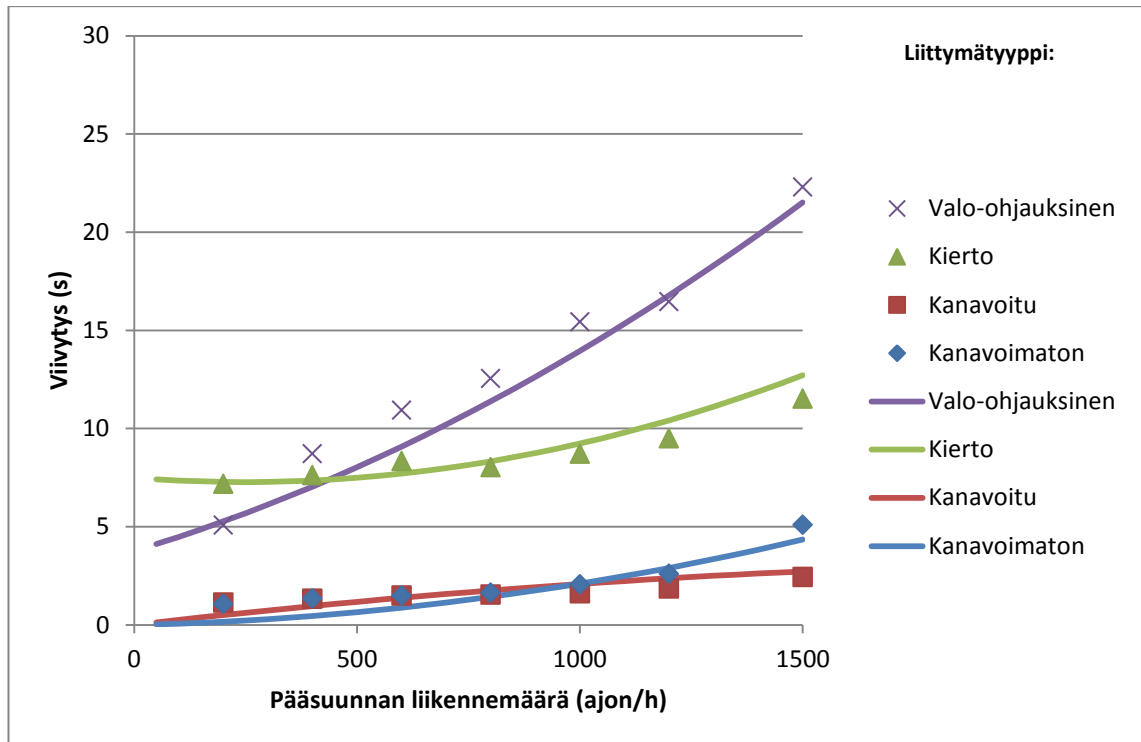
Kuvissa 13 ja 14 on esitetty malleilla lasketut sekä simuloidut keskimääräiset viivytykset eri nelihaaraisille liittymätyypeille sivusuunnan liikennemäärän ollessa 20 % pääsuunnan liikennemäärästä. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty malleilla lasketut sekä simuloidut keskimääräiset viivytykset eri kolmihaaraisille liittymätyypeille sivusuunnan liikennemäärän ollessa 40 % pääsuunnan liikennemäärästä. Liitteessä 6 on esitetty eri liittymätyyppien viivytyskuvaajat ja simuloidut keskimääräiset viivytykset sivusuuntien eri osuuksilla.



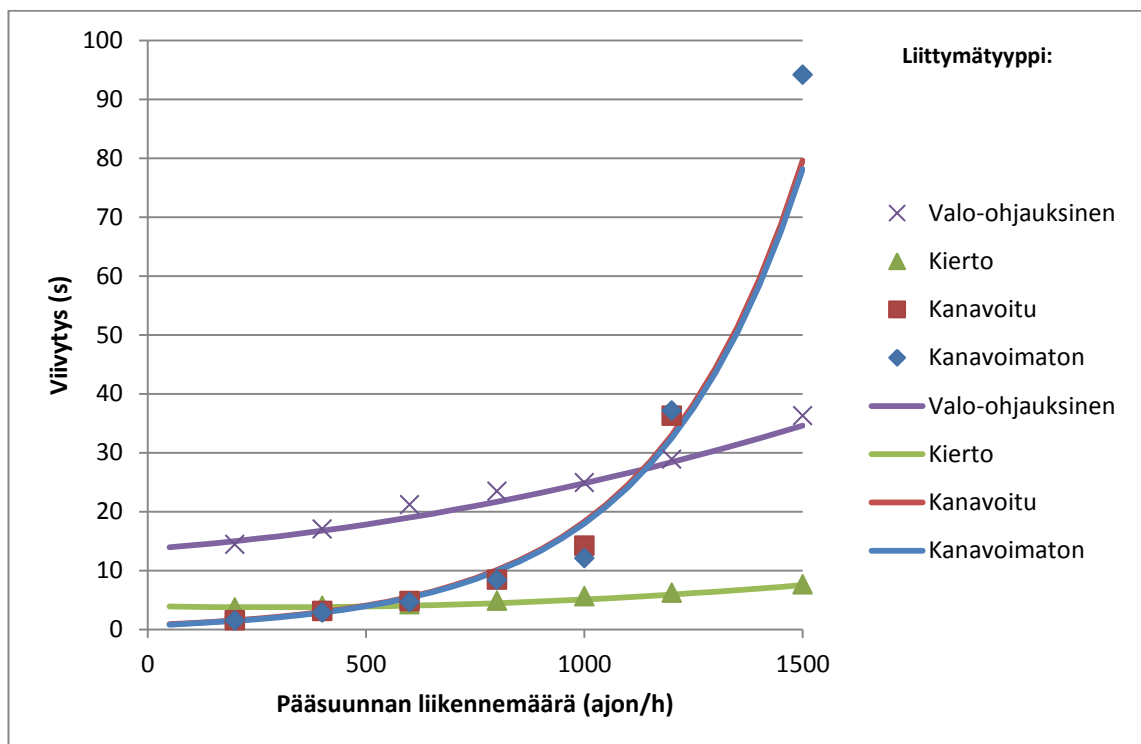
Kuva 13. Pääsuunnan keskimääräiset viivytykset nelihaaraliittymissä sivusuunnan liikennemäärän ollessa 20 % pääsuunnan tasosta. Simulointitulokset on merkitty pisteillä ja mallien tulokset käyrillä.



Kuva 14. Sivusuunnan keskimääräiset viivytykset nelihaaraliittymissä sivusuunnan liikennemäärän ollessa 20 % pääsuunnan tasosta. Simulointitulokset on merkitty pisteillä ja mallien tulokset käyrillä.



Kuva 15. Pääsuunnan keskimääräiset viivytykset kolmihaaraliittymissä sivusuunnan liikennemäärän ollessa 40 % pääsuunnan tasosta. Simulointitulokset on merkitty pisteillä ja mallien tulokset käyrillä.



Kuva 16. Sivusuunnan keskimääräiset viivytykset kolmihaaraliittymissä sivusuunnan liikennemäärän ollessa 40 % pääsuunnan tasosta. Simulointitulokset on merkitty pisteillä ja mallien tulokset käyrillä.

5.3 Tulosten tarkastelu

Neliömuotoisten funktioiden voidaan todeta soveltuvan hyvin sekä neli- että kolmihaaraliittymien pääsuuntien keskimääräisen viivytyksen kuvaamiseen. Pääsuunnille neliömuutoksen avulla tehtyjen regressioanalyysien voidaan todeta selittävän keskimääräistä viivytystä hyvin, selitysasteiden ollessa 0,866 ja 0,971 välillä.

Mallien toimivuus voidaan todeta myös vertaamalla malleilla laskettuja kuvaajia simuloituihin viivytyksiin. Kanavoimattomien ja kanavoitujen liittymien pääsuunnissa ainoastaan vasemmalle kääntyvä virta joutuu väistämään vastakkaisen pääsuunnan liikennettä, jolloin keskimääräinen viivytys ei ole voimakkaasti riippuvainen pää-, eikä sivusuunnan liikennemäärästä. Porrastetussa liittymässä sivusuuntien suoraan ajava liikenne kuormittaa pääsuuntia, mikä näkyy viivytyksen kasvuna suurilla liikennemäärillä. Valo-ohjauksen aiheuttama ohjausviive näkyy pääsuunnan suhteellisen korkeana viivytyksenä valo-ohjauksettomiin liittymiin verrattuna. Kiertoliittymässä geometrinen viive on puolestaan hallitsevin komponentti, mikä näkyy melko tasaisena viivytyksenä eri liikennemäärillä. Muusta liikenteestä aiheutuva viive kasvaa kiertotilan liikenteen kasvessa, mikä näkyy viivytyksen suhteellisen korkeana kasvuna sivusuunnan osuuden ollessa korkea.

Valo-ohjaus ja kiertoliittymä parantavat sivusuuntien välityskykyä, jolloin neliömuotoiset funktiot kuvaavat hyvin valo-ohjauksisten liittymien ja kiertoliittymien viivytyksiä selitysasteilla 0,861 ja 0,857. Kanavoimattomille ja kanavoiduille liittymille sekä porrastetulle liittymälle ei sen sijaan saatu neliömuotoisilla funktioilla loogisesti käyttäytyviä ja tilastollisesti merkitseviä malleja. Näille liittymille tehtyjen eksponenttifunktioiden voidaan todeta käyttäytyvän loogisesti ja olevan tilastollisesti merkitseviä selitysasteiden ollessa 0,735 ja 0,920 välillä. Lähestyttäessä liittymän välityskykyä simuloitujen viivytykset kasvavat suhteellisen voimakkaasti, malleilla laskettujen ollessa selvästi niitä pienempiä.

Eritasoliittymille ei saatu täysin toimivia malleja suoraan tässä työssä käytetyllä menetelmällä. Simuloidut viivytykset ovat niin pieniä, että mallit eivät toimi loogisesti. Funktioista muodostui lievästi ylöspäin kuperia, jolloin ne eivät kuvaa viivytyksiä realistisella tavalla.

Yksiramppisen eritasoliittymän sivusuunnan ajoneuvot ovat väistämisvelvollisia liittyessään rampilta pääsuunnalle, jolloin niille aiheutuu enemmän viivytystä useampramppisiin liittymiin verrattuna. Eksponenttimuotoinen funktio kuvaakin simuloituja viivytyksiä 0,851 selitysasteella. Myös osa pääsuunnan kääntyvistä ajoneuvoista on väistämisvelvollisia, mikä näkyy korkeampina keskimääräisinä viivytyksinä muihin eritasoliittymiin verrattuna.

Yleisesti ottaen voidaan neliöfunktioissa todeta epätarkkuutta viivytysten ollessa hyvin pieniä. Eksponenttifunktiot puolestaan tuottavat simulointituloksia pienempiä viivytyksiä tilanteissa, joissa lähestytään liittymän välityskykyä ja viivytys kasvaa hyvin voimakkaasti.

Kierto- ja eritasoliittymien tuloksia tarkasteltaessa voidaan havaita ohjelmiston käyttämissä viivytyksen määrittelytavassa tiettyjä rajoitteita. Ohjelma ei ota huomioon esimerkiksi eritasoliittymän silmukkaramppien kautta kiertävälle liikenteelle ramppien geometriasta ja pidentyneestä ajomatkasta johtuvaa viivettä, jolloin se on mahdollisesti huomioitava erikseen eritasoliittymien viivytyksiä tarkasteltaessa. Määrittelytavasta

johtuen viivytyksessä ei myöskään täysin näy alennetusta nopeusrajoituksesta aiheutuva viive, vaan ohjelma olettaa nopeusrajoituksen olevan voimassa myös vertailutilanteessa.

Malleja tarkasteltaessa tulee myös huomioida, että ne ovat luotettavia vain simuloituilla liikennemäärien tasoilla. Siten niitä ei voida sellaisenaan käyttää välityskyvyltään ylityneiden liittymien tarkasteluun.

6 Liittymämallit IVAR-ohjelmiston versiossa 3.0

6.1 Solmujen ominaisuudet

Solmut ovat pistemäisiä ja niihin liittyy aina yksi tai useampi linkki. Solmut yksilöidään P- ja I-koordinaattien avulla. Tierekisteristä poimittaville solmuille saadaan kuvaus sen ominaisuuksista, kuten päätien poikkileikkauksesta, nopeusrajoituksesta ja onnettomuusmääristä. Päätieverkon liittymien tietoja on täydennetty lisäksi etuajo-oikeuksilla ja kaistamäärillä. (Ristikartano ym. 2011.)

Solmu määritellään liittymäksi lähtötietona saatavan tai annettavan liittymätyypin avulla. Laskentakelpoiseen liittymään liittyy pääsääntöisesti yli kaksi linkkiä. Kullekin liittymälle määritetään poimittaessa IVARin sisäinen liittymätyyppi, jonka avulla voidaan erotella erilaisia liittymän perusratkaisuja. Liittymät on jaoteltu kolmi- ja useampihaaraisiin liittymiin, sekä eroteltu taajama- ja haja-asutusalueen liittymiin. Tavanomaisten tasoliittymien lisäksi käytettävissä on kierto-, ramppi- ja eritasoliittymiä koskevia ratkaisuja. Liikennevalo-ohjaus ja sivusuunnan pysähtymispakko voidaan myös määrittää lisätietona. (Ristikartano ym. 2011.)

Liittymien liikennemäärät saadaan liittymään tulevien linkkien liikennemääristä, jotka erotellaan pää- ja sivusuuntiin. Jollei linkille ole määritetty tarkempaa suuntajakaumaa, otetaan sen liikennemäärästä mukaan puolet. Nykyisessä versiossa kääntyvien viritöjen osuukien määrittely ei ole mahdollista. (Ristikartano ym. 2011.)

6.2 Liittymien laskentamallit

Liittymien laskennan lähtökohtana käytetään IVAR-ohjelmistossa keskivuorokausiliikennetasoisia tietoja. Tuntiliikenteet lasketaan keskivuorokausiliikenteestä kohteen perusteella valitun tuntijärjestyskäyrän avulla. Perustilanteessa tuntijärjestyskäyrä valitaan IVARissa tierekisteritietojen luvun yhteydessä ELY-alueen, tieluokan ja tierekisterin keskimääräisen vuorokausiliikenteen perusteella. Käyttäjä voi myös itse muuttaa käytettävää tuntijärjestyskäyrää. (Liikennevirasto 2013c.)

Tuntijärjestyskäyrällä KVL jaotellaan tuntien vilkkauksen mukaan osiin. Tuntijärjestyskäyrältä valitaan vuoden tietyt tunnit, esimerkiksi vuoden vilkkain, 100., 1000. ja hiljaisin (8760.) tunti. Kullekin liittymän tulosuunnalle määritetään liikennemäärät tuntijärjestyskäyrän mukaisten tuntiliikenneprosenttien avulla, minkä jälkeen kullekin tunnille lasketaan tässä työssä kehitetyillä malleilla keskimääräinen viivytys tulosuunnittain. (Liikennevirasto 2013c.)

Kehitetyt neliö- ja eksponenttimuotoiset kaavat yhdistetään IVAR-ohjelmistoa varten yhdeksi kaavaksi. IVAR-ohjelmistossa tuntijärjestyskäyrän tuntien viivytykset lasketaan tällöin kaavasta, joka on muotoa (Liikennevirasto 2013d):

$$y = x_0 + x_1ps + x_2ss + x_3ps^2 + x_4ss^2 + x_5psss + x_6e^{x_7ps+x_8ss} \quad (12)$$

missä x_0 = liittymätyyppikohtainen vakio-termi neliöfunktia käytettäessä
 $x_1 \dots x_5$ = liittymätyyppikohtaiset kertoimet neliöfunktia käytettäessä
 $x_6 \dots x_8$ = liittymätyyppikohtaiset kertoimet eksponenttifunktia käytettäessä.

Käytettävät kertoimet määräytyvät liittymätyypin mukaan siten, että kertoimet $x_6 \dots x_8$ saavat neliömuotoista funktiota käytettäessä arvokseen 0. Vastaavasti kertoimet $x_0 \dots x_5$ saavat eksponenttifunktiota käytettäessä arvon 0. Käytettävät pää- ja sivusuuntien liikennemäärät määräytyvät tunnin vilkkauden mukaan prosenttiosuutena keskivuorokausiliikenteestä.

Viivytysten muutosten perusteella arvioidaan ohjelmiston käyttämien ajotapojen osuudet, jolloin viivytysmallit ovat yhdistettävissä ohjelmiston muihin malleihin. Kokonaisviivytykseen täydennetään nopeusmuutoksista johtuvat hidastus- ja kiihdytysajat ajoneuvoryhmittäin. (Liikennevirasto 2013c.)

Tuntiliikenteiden perusteella määritetyt viivytykset muutetaan vuositasolle tuntijärjestyskäyrien avulla. Liittymän keskimääräiset vuosiviivytykset eri tulosuunnille saadaan laskemalla kultakin tuntiväliltä edellisen ja tarkasteltavan tunnin keskimääräinen viivytys tuntiliikenneprosentteilla painotettuna, ja summaamalla näin saadut viivytykset. (Liikennevirasto 2013c.)

Liittymistä aiheutuvat matka-aikamuutokset lisätään tulosuunnittain linkkien matkaiikoihin. Matka-aikamuutosten perusteella lasketaan liittymistä aiheutuvat polttoaineen lisäkulutus, pakokaasupäästöt sekä aika-, ajoneuvo- ja päästökustannukset.

Liittymämallien toimivuus ja käyttökelpoisuus varmistetaan uuden ohjelmistoversion testausvaiheessa ennen niiden varsinaista käyttöönottoa. Testausvaiheessa malleihin voidaan tehdä vielä muutoksia, mikäli se havaitaan tarpeelliseksi.

6.3 Liittymätyypit

IVAR-ohjelmiston laskentamallit on rakennettu siten, että niiden sisältämien kaavojen vakioarvot on sijoitettu parametritauluihin. Solmujen laskenta perustuu niiden luokitteluun, joka tapahtuu Liittymätyyppi-parametritaulun perusteella. Versiossa 3.0 liittymätyyppien numerointi uudistetaan ja muodostetaan kokonaan uusia liittymätyyppejä. Taulukossa 10 on esitetty luonnos ohjelmiston uuden version liittymätyypeistä.

Taulukko 10. Liittymätyypit IVAR-ohjelmiston versiossa 3.0 (Liikennevirasto 2013d).

Liittymä- tyyppi	Kuvaus	Ohjaus- koodi	Vminkev	Vminras
0	Liittymätyyppi tuntematon	0		
1	Tasoliittymä, 3-haarainen, kanavoimaton	1	20	20
2	Tasoliittymä, 4-haarainen, kanavoimaton	1	20	20
3	Tasoliittymä, 3-haarainen, kanavoitu	1	25	25
4	Tasoliittymä, 4-haarainen, kanavoitu	1	25	25
5	Tasoliittymä, 3-haarainen, väistötila	1	20	20
6	Yksikaistainen kiertoliittymä	1	30	30
7	Kaksi- tai useampikaistainen kiertoliittymä	1	25	25
8	Monikaistaisen tien tasoliittymä 3-haarainen	1	25	25
9	Monikaistaisen tien tasoliittymä 4-haarainen	1	25	25
10	Tasoliittymä, porrastettu 4-haarainen	1	25	25
11	Suuntaisliittymä (eritasoliittymän osana)	1	30	30
12	Rampin liittymä (eritasoliittymän osana)	1	30	30
13	Perusverkon eritasoliittymä, 1 ramppi	1	30	30
14	Perusverkon eritasoliittymä, 2 ramppia tai enemmän	1	30	30
15	Moottoriliikennetien eritasoliittymä	1	30	30
16	Monikaistaisen päätien eritasoliittymä, rampin/sivusuunnan liittymässä väistämisvelvollisuus	1	25	25
17	Monikaistaisen päätien eritasoliittymä, rampin/sivusuunnan liittymä kiertoliittymä	1	30	30
18	Monikaistaisen päätien eritasoliittymä, rampin/sivusuunnan liittymä liikennevalo-ohjattu	1	25	25
19	Monikaistaisen päätien eritasoliittymä, suorat rampit (systeemiliittymä)	1	60	60
21	Linkin katkaisu	0		
22	Linkin päättymispiste	0		
23	Lossi	0		
24	Rautatien tasoristeys	0		
25	Valo-ohjattu suoja-atie	0		

Liittymätyypin kannalta olennaisia parametreja ovat ohjauskoodi ja miniminopeudet kevyille (Vminkev) ja raskaille (Vminras) ajoneuvoille. Liittymän ohjaustapa määräytyy erillisen liittymäryhmä-parametritaulun perusteella. (Liikennevirasto 2013d.)

Taulukossa esitetyistä liittymätyypeistä on tämän työn yhteydessä käsitelty liittymätyyppejä 1-4, 6, 13 ja 14.

7 Case-tutkimus: Meijeritien ja Monninkyläntien liittymä

Työn aikana suoritettiin Uudenmaan ELY-keskuksen toimeksiannosta Askolassa kanta-tiellä 55 sijaitsevan Meijeritien ja Monninkyläntien liittymän alustava hankearviointi (Syrjäläinen ym. 2014). Hankearvioinnissa tarkasteltiin vaihtoehtoisten liittymätyyppien vaikutuksia ja vaikuttavuuksia matka-aikoihin ja liikenneturvallisuuteen.

Meijeritien ja Monninkyläntien liittymä on nykyisin valo-ohjaukseton, pääsuunnassa kanavoitu nelihaaraliittymä, jossa sivusuunnilla on pysähtymispakko. Kevyelle liikenteelle on liittymässä alikulku.

Vaihtoehtoisina liittymätyypeinä tarkasteltiin neljää erilaista eritasoliittymää, kahta valo-ohjauksista liittymää sekä kiertoliittymää. Eri liittymävaihtoehtoista käytettiin työssä seuraavia nimiä:

- VE0: nykytilanteen mukainen tasoliittymä
- VE1: eritasoliittymä silmukkarampeilla
- VE4: eritasoliittymä rombisilla rampeilla
- VE5: eritasoliittymä, jossa rombiset rampit länsipuolella ja silmukkaramppi itäpuolella
- VE6: eritasoliittymä, jossa silmukkaramppi länsipuolella ja rombiset rampit itäpuolella
- VE7: valo-ohjauksinen liittymä, jossa liittymäalue vastaa nykytilannetta
- VE8: valo-ohjauksinen liittymä, jossa sivusuunnilla on kääntymiskaistat vasemmalle
- VE9: kiertoliittymä.

Koska nykyisellä IVAR-ohjelmistolla ei voida arvioida vaikutuksia tulosuunnittain, eikä sen avulla saada selvityksessä tarkastelluille erilaisille eritasoliittymävaihtoehtoilte luotettavia arvioita, tarkennettiin ohjelmiston laskentatuloksia simulointien avulla.

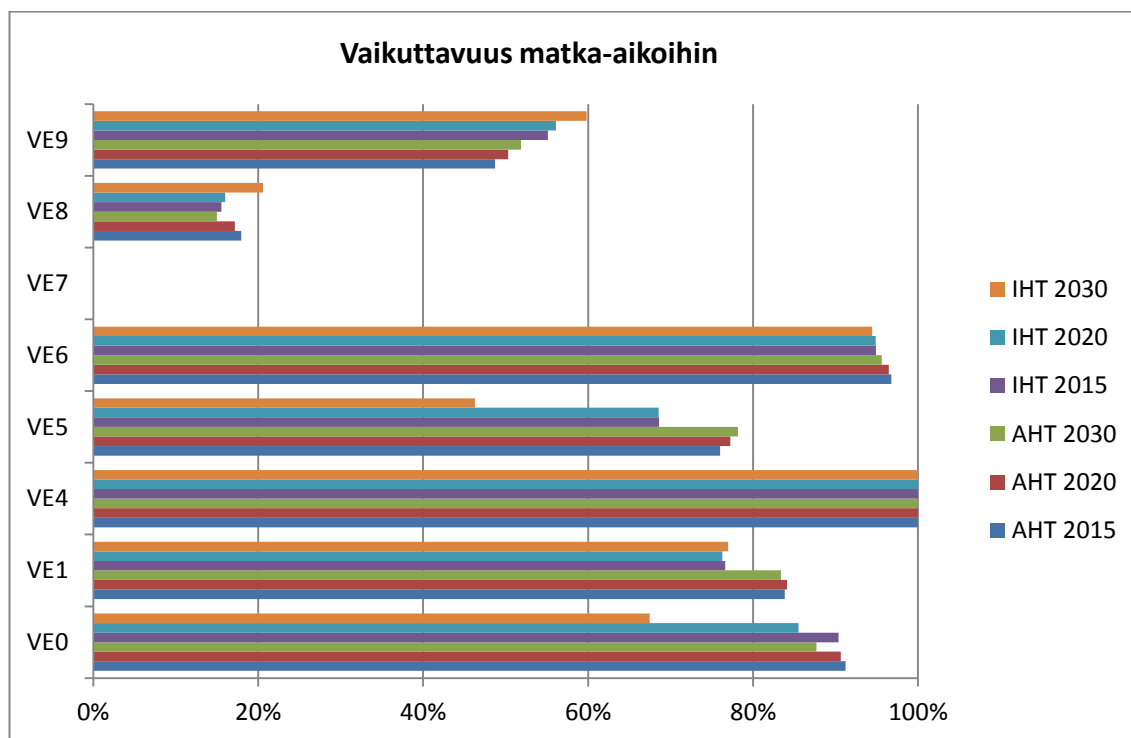
Vaikutusten arvioinnin lähtötiedoksi tehtiin liittymätyypeille simuloinnit Paramics-ohjelmistolla. Tehdyistä simuloinneista koottiin toteutuneet matkat ja niiden matka-ajat. Kullekin liittymävaihtoehdolle laskettiin matka-ajoista kääntymisvirtojen liikennemäärillä painotetut keskiarvot kolmen eri ennustevuoden aamu- ja iltahuipputunteina. Matka-ajat ja eri liittymävaihtoehtojen vaikuttavuudet on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Vaihtoehtojen keskimääräiset matka-ajat ja vaikuttavuudet eri ennustetilanteissa (Syrjäläinen ym. 2014).

	Matka-aika (s)										Vaikuttavuus							
	Huonoin	VE0	VE1	VE4	VE5	VE6	VE7	VE8	VE9	Paras	VE0	VE1	VE4	VE5	VE6	VE7	VE8	VE9
AHT 2015	72	47	49	45	51	46	72	67	59	45	91 %	84 %	100 %	76 %	97 %	0 %	18 %	49 %
AHT 2020	74	48	50	45	52	46	74	69	59	45	91 %	84 %	100 %	77 %	96 %	0 %	17 %	50 %
AHT 2030	75	49	50	45	52	47	75	71	60	45	88 %	83 %	100 %	78 %	96 %	0 %	15 %	52 %
IHT 2015	75	50	54	47	56	49	75	71	60	47	90 %	77 %	100 %	69 %	95 %	0 %	16 %	55 %
IHT 2020	77	52	54	47	57	49	77	72	60	47	86 %	76 %	100 %	69 %	95 %	0 %	16 %	56 %
IHT 2030	82	59	56	48	66	50	82	75	62	48	67 %	77 %	100 %	46 %	94 %	0 %	21 %	60 %

Simuloinneista saatuja liittymäkohtaisia huipputuntien matka-aikoja verrattiin IVAR-ohjelmiston laskemiin keskimääräisiin viivytyksiin ja matka-aikoihin. Nykyisen liittymäratkaisun matka-aikatulokset vastasivat eri vuosien liikennemäärillä varsin hyvin toisiaan, mutta etenkin kiertoliittymän, valo-ohjauksisten liittymien ja muutaman eritasoliittymäratkaisun arvot poikkesivat ohjelmiston tuloksista merkittävästi. Kaikkien suunnitelmavaihtoehtojen IVAR-tulokset muunnettiin vastaamaan tehtyjä simulointeja ja eri vuosilta laskettiin muunnoskertoimet. Näiden keskiarvoa käytettiin aikakustannusten korjauskertoimina. Valo-ohjauksisissa liittymissä keskimääräisen odotusajan arvioitiin olevan noin puolet huipputuntien odotusajoista.

Tuloksena saatujen matka-aikojen perusteella vähiten viivytyksiä aiheuttava liittymävaihtoehto on eritasoliittymä rombisilla rampeilla. Eritasoliittymä silmukkarampeilla sen sijaan pidentää keskimääräisiä matka-aikoja kaikissa muissa kuin ennustevuoden 2030 iltahuipputuntin tilanteissa. Silmukkaramppien ja rombisten ramppien yhdistelmissä vaikutus riippuu puolestaan kääntyvien virtojen liikennemääristä. Kierto- ja valo-ohjauksisissa liittymissä matka-ajat ovat sen sijaan kaikissa tapauksissa pidempiä kuin tasoliittymässä. Kuvassa 17 on havainnollistettu eri vaihtoehtojen vaikuttavuudet matka-aikoihin.



Kuva 17. Vaihtoehtojen vaikuttavuus keskimääräisiin matka-aikoihin (vaikuttavuuden arvo 0 % kuvaa huonointa ja 100 % parasta vaihtoehtoa) (Syrjäläinen ym. 2014).

Rombisen liittymän aiheuttamien viivytysten tarkastelu osoittaa eritasoliittymissä muusta liikenteestä aiheutuvan viiveen olevan käytetyillä liikennemäärillä hyvin pieni.

Silmukkaramppien geometriasta aiheutuva viive on rombisista rampeista aiheutuvaa suurempi. Oikealle kääntyvälle liikenteelle aiheutuva geometrinen viive on paremmasta geometriasta johtuen pienempi kuin tasoliittymässä oikealle kääntyvälle aiheutuva viive.

Silmukkaramppien ja kiertoliittymän aiheuttaman viivytyksen voidaan katsoa koostuvan suurelta osin liittymien geometriasta. Silmukkaramppien vaikutusta korostaa niistä aiheutuva ajomatkan pidentyminen.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

8.1 Yhteenveto

Työssä kehitettiin hankearviointiin soveltuvat laskentamallit liittymien viivytysten arvioimiseksi. Mallien avulla voidaan määrittää liittymätyyppien aiheuttamat keskimääräiset viivytykset eri pää- ja sivusuuntien liikennemäärillä. Työn taustalla ovat Liikenneviraston uusi Tiehankkeiden arviointiohje (2013) ja Tieverkon investointihankkeiden vaikutusten arviointiohjelmisto (IVAR). IVAR-ohjelmiston nykyiset liittymien viivytysmallit eivät sovellu ohjeiden edellyttämään vaikuttavuuden arviointiin, koska ne on tehty vain kannattavuuslaskentaa varten.

Liittymätyypeistä tarkasteltiin kanavoimatonta sekä kanavoitua kolmi- ja nelihaaraista liittymää, kolmi- ja nelihaaraista kiertoliittymää, porrastettua liittymää sekä kolmea eritasoliittymää. Kanavoitujen liittymien ohjaustapoina käytettiin sivusuunnan väistämismallin mallisuutta, pysähtymispakkoa ja valo-ohjausta.

Mallit muodostettiin Paramics-mikrosimulointiohjelmistolla määritettyjen viivytysten perusteella. Viivytykset määritettiin ajamalla simulointiajoja eri pää- ja sivusuuntien tuntiliikennemäärillä. Simuloituja viivytyksiä käsiteltiin tulosuunnittain keskimääräisinä kokonaisviivytyksinä, ja mallit muodostettiin erikseen liittymän pää- ja sivusuunnille. Mallit on muodostettu tuntiliikenteiden pohjalta siten, että ne ovat laajennettavissa vuosisitasolle tuntijärjestyskäyrien avulla.

Matemaattiset mallit muodostettiin SPSS Statistics -ohjelmalla lineaarista regressioanalyysia käyttäen. Muodoltaan mallit ovat neliö- ja eksponenttifunktioita, joiden selittävinä muuttujina on käytetty pää- ja sivusuunnan liikennemääriä.

Neliöfunktioilla saatiin loogisesti toimivat ja selittävydeltään hyvät mallit kolmi- ja nelihaaraliittymien sekä porrastetun liittymän pääsuunnille. Sivusuunnista neliöfunktioilla saatiin selittävydeltään hyvät ja loogisesti toimivat mallit valo-ohjauksille ja kiertoliittymille. Kanavoimattomien ja kanavoitujen liittymien sekä porrastetun liittymän sivusuunnille käytettiin eksponenttifunktiota. Eritasoliittymille ei saatu täysin toimivia malleja suoraan tässä työssä käytetyillä menetelmillä.

IVAR-ohjelmiston versiossa 3.0 on varauduttu liittymämallien uusimiseen, jolloin työssä kehitetyt viivytysmallit voidaan ottaa käyttöön uutta ohjelmistoversiota testattaessa. Työn aikana suoritettiin Uudenmaan ELY-keskuksen toimeksiannosta Meijeritien ja Monninkyläntien alustava hankearviointi, jonka yhteydessä vaihtoehtoisille liittymätyypeille tehtyjen simulointien tuloksia voidaan hyödyntää mallien testausvaiheessa.

8.2 Mallien luotettavuus ja yleistettävyys

IVAR-ohjelmiston karkean tarkkuustason vuoksi malleja luotaessa jouduttiin käyttämään oletuksia esimerkiksi suuntajakauman ja kääntyvien virtojen suhteen. Käytettyjen oletusten vuoksi mallit kuvaavat parhaiten tilannetta, jossa liikenteen suuntajakauma on tasainen ja sivusuuntien liikennevirrat jakautuvat suhteellisen tasaisesti kaikille poistumishaaroille. Alempien tasojen virtojen jakautumisella on kuitenkin vaikutus keskimääräisiin viivytyksiin, erityisesti sivusuunnan vasemmalle kääntyvä liikenne on kriittinen keskimääräistä viivytystä määritettäessä. Näin ollen mallit eivät anna realistista kuvaa tilanteesta, jossa liikenne on jakautunut voimakkaasti eri tulosuunnille tai jokin saapuvista virroista suuntautunut voimakkaasti vasemmalle. Mallit on luotu käytettäväksi

hankearvioinnissa, jolloin niiden tuloksia voidaan yksittäistapauksia tarkasteltaessa pitää vain suuntaa-antavina. Vuosittaisia vaikutuksia tarkasteltaessa hiljaisen liikenteen tunteja on suhteellisesti eniten, jolloin yksittäisten kuormittuneiden tuntien merkitys vuoden keskimääräisiin viivytyksiin on suhteellisen vähäinen.

Malleja käytettäessä on huomioitava, että ne on muodostettu simulointitulosten pohjalta. Osassa simulointituloksista näkyy jonkin verran simulointitulosten satunnaisvaihtelusta johtuvaa epäsäännöllisyyttä. Satunnaisvaihtelua olisi voitu vähentää suorittamalla useampia, esimerkiksi 10, ajoa jokaista liikennemäärä kohden. Se olisi kuitenkin moninkertaistanut myös simulointeihin kuluneen työajan. Mallit ovat luotettavia vain simuloinneissa käytetyillä liikennemäärien tasoilla, eivätkä ne välttämättä vastaa täysin todellisuutta tilanteissa, joissa liittymän välityskyky on ylittynyt tai ylittymäisillään.

Toisaalta kysyntähuipun muoto (vrt. kuva 4) vaikuttaa huipputunnin aikaisiin viivytyksiin. Simuloinneissa tunnin aikainen kysyntä on suorakulmion muotoinen, kun todellisuudessa se voi olla kolmion muotoinen, jolloin välityskyky ei ylity koko tunnin aikana. Näin ollen todellinen keskimääräinen viivytys huipputunnin aikana saattaa olla simuloituja viivytyksiä pienempi.

Malleissa viivytystä on käsitelty toteutuneen ajoajan ja vapaan nopeuden ajoajan erotuksena määritettynä keskimääräisenä kokonaisviiveenä. Näin ollen tulokset eivät ole suoraan verrattavissa HCM:n ja muiden analyttisten menetelmien tuloksiin, joiden viivytys sisältää vain keskimääräisen ohjausviiveen. Mallien viivytysten perusteella ei siten voida myöskään suoraan määritellä HCM:n mukaisia liittymien palvelutasoja.

Malleja määritettäessä havaittiin Paramicsin ja muiden mikrosimulointiohjelmistojen käyttämässä viivytysten määrittystavassa tiettyjä rajoitteita. Ohjelmistot ilmoittavat viivytyksen kokonaisviivytyksenä, joka määritetään linkeittäin nopeusrajoituksen mukaisen vapaan nopeuden ajoajan ja toteutuneen ajoajan erotuksena. Tällöin kierto- ja eritasoliittymissä pidentyneestä ajomatkasta aiheutuva geometrinen viive ei tule täysin huomioiduksi.

Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa eri simulointiohjelmilla määritettyjen kiertoliittymien viivytysten vertailuun maastossa mitattuihin arvoihin on käytetty saapumisviivettä (approach delay), jolloin viivytys on määritetty vain saapumislinkille (Gagnon ym. 2008). Viivytys koostuu tällöin käytännössä liikenneviiveestä ja osittaisesta ohjausviiveestä, sillä uudelleen kiihdyttämisestä aiheutuvaa viivettä ei oteta huomioon.

Työssä käytetyt liikennemäärät olivat suhteellisen pieniä eritasoliittymien välityskykyihin nähden, jolloin muusta liikenteestä aiheutuvan viiveen osuus jäi simuloituissa viivytyksissä hyvin pieneksi. Eritasoliittymille tulisikin suorittaa lisäsimulointeja suuremmilla liikennemäärillä, jotta malleihin saataisiin mukaan myös liikenneviiveen vaikutus.

Meijeritien ja Monnikyläntien liittymän simulointien perusteella voidaan havaita selviä eroja eri eritasoliittymävaihtoehtojen välillä. Matka-ajat rombisessa liittymässä ovat joka tulosuunnalla pienemmät kuin silmukkarampillisessa liittymässä, mikä tukee näkemystä siitä, ettei Paramicsin käyttämä viivytyksen määrittelytapa sovellu suoraan eritasoliittymien kokonaisviivytyksien määrittämiseen. Simulointien tulokset ovat samalla vertailuaineistona IVARin uuden ohjelmistoversion testaamisessa ja mahdollisessa kalibroimisessa.

8.3 Suositukset

Mallien toiminta tulisi testata ja validoida IVAR-ohjelmiston uuden version testausvaiheessa esimerkiksi analyyttisiä menetelmiä käyttäen, jolloin mallien mahdollinen kalibrointi voitaisiin suorittaa ennen uuden ohjelmistoversion käyttöönottoa. Eri menetelmillä saatuja tuloksia vertailtaessa on huomioitava mahdolliset eroavaisuudet niiden käyttämissä viivytyksen määrittelytavoissa.

Eritasoliittymille tulisi muodostaa mallit suuremmilla liikennemäärillä simuloitujen viivytysten perusteella. Geometrisen viiveen vaikutus tulee mahdollisesti huomioida lisäviiveenä malleissa. IVAR-ohjelmiston päivityksen kannalta tarkastelua tulee laajentaa myös monikaistaisten teiden taso-, kierto- ja eritasoliittymiin. Lisäksi tulisi tarkastella eri nopeusrajoitusten vaikutusta viivytyksiin.

Jatkotutkimuksia olisi syytä tehdä liittymien viivytyksen, etenkin sen eri komponenttien, määrittämisestä simulointien avulla. Erityisesti tulisi tarkastella kierto- ja eritasoliittymien viivytyksiä ja niiden määrittelemistä simulointiohjelmistojen avulla. Lisäksi tulisi tarkastella eri ohjelmistojen kykyä mallintaa liikenneympäristön geometrias- ta aiheutuvaa viivettä.

Simulointiohjelmistojen kehittyessä jatkuvasti, ja ohjelmistojen ominaisuuksien lisääntyessä uusien ohjelmistoversioiden myötä, tulisi vertailua ja validointia suorittaa ohjelmistoille tasaisin väliajoin. Vertailua ja validointia tulisi suorittaa jo Suomessa käytettävien, ja mahdollisten uusien ohjelmistojen ja ominaisuuksien soveltuvuudesta erilaisiin käyttötarkoituksiin.

Lähdeluettelo

- Cagnon, C., Sadek, A.W., Touchette, A. & Smith, M. 2008. Calibration Potential of Common Analytical and Micro-simulation Roundabout Models: A New England Case Study. Washington D.C., USA: Transportation Research Board, 87th Annual Meeting.
- Hannus, S. & Louhenkilpi, T. 1976. Simulointi. Espoo: Otadata ry. Julkaisu C 25.
- Helelä, M. 2010. Simulointimallien vertailu. Espoo: Ramboll Finland Oy, Sisäinen tutkimus- ja kehitysprojekti. Julkaisematon raporttimuistio.
- Kari, H. 1993. Liittymien viivytys- ja polttoaineenkulutusmallit. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. Espoo. 226 s.
- Kari, H. 1997. IVAR-ohjelmiston mallien liikennetekninen kehittäminen. Helsinki: Tiehallinto. Julkaisematon raportti.
- Kosonen, T. 2000. Liikenteen simulointiohjelmat. Teoksessa: Pursula, M., Niittymäki, J. & Ojala, J. (toim.) Liikenteen simulointi. Liikennetekniikan seminaari 1999-2000. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Julkaisu 101. ISBN 951-22-4955-3.
- Liikennevirasto. 2012. Liikenteen välityskykytarkastelukäytännöt. Helsinki: Liikennevirasto, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37/2012. ISBN 978-952-255-189-4.
- Liikennevirasto. 2013a. Tiehankkeiden arviointiohje. Helsinki: Liikennevirasto, Liikenneviraston ohjeita 13/2013. ISBN 978-952-255-263-1.
- Liikennevirasto. 2013b. Tieliikenteen toimivuuden arviointi. Helsinki: Liikennevirasto, Liikenneviraston ohjeita 36/2013. ISBN 978-952-255-366-9.
- Liikennevirasto. 2013c. IVAR, Investointihankkeiden vaikutusten arviointiohjelmisto, Laskentojen systeemimääritelmä. Luonnos version 3.0 toteutusvaihetta varten.
- Liikennevirasto. 2013d. IVAR-ohjelmiston version 3.0 parametritaulujen ylläpito. Luonnos.
- Luttinen, R.T. & Nevala, R. 2002. Capacity and Level of Service of Finnish Signalized Intersections. Helsinki: Tiehallinto, Finnra Reports 25/2002. ISBN 951-726-903-X.
- Luttinen, R.T. 2004. Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections. Helsinki: Tiehallinto, Finnra Reports 1/2004. ISBN 951-803-180-0.
- Luttinen, R.T., Pursula, M. & Innamaa, S. 2005. Liikennevirran ominaisuudet. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Opetusmoniste 15. ISBN 951-22-7995-9.
- Ojala, K. (vast. toim.) 2005. Liikenne ja väylät I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, RIL 165-1-2005. ISBN 951-758-459-8.

Oketch, T., Delsey, M. & Robertson, D. 2004. Evaluation of Performance of Modern Roundabouts Using Paramics Micro-simulation Model. Whitby, Kanada: TSH Associates.

PTV. 2013. PTV Vissim 6 User Manual. PTV AG.

Quadstone Paramics. 2011. The Paramics Manuals. Quadstone Paramics LTD.

Quadstone Paramics. 2014. How is turning delay calculated in Paramics? Paramics Support Center. [Viitattu 20.10.2014] Saatavissa (vaatii kirjautumisen):
http://www.paramics-online.com/support-center/index.php?x=&mod_id=2&id=629

Ristikartano, J., Sirkiä, A., Sumentola, J. & Touru, T. 2011. Tiehankkeiden vaikutusmallin kehittäminen, esiselvitys. Helsinki: Liikennevirasto, liikennesuunnitteluosasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 46/2011. ISBN 978-952-255-725-4.

Rouphal, N., Tarko, A. & Li, J. 2002. Traffic Flow at Signalized Intersections. Teoksessa: Gartner, N., Rathi, A. & Messer, J. (toim.) Revised Monograph on Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. [Viitattu 3.12.2014] Saatavissa:
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/>

Syrjäläinen, K., Ristikartano, J. & Musto, M. 2014. Meijeritien ja Monnikyläntien liittymän simuloinnit ja alustava hankearviointi. Espoo: Ramboll Finland Oy. Raporttimuistio.

Tian, Z.Z., Urbanik II, T., Engelbrecht, R. & Balke, K. 2002. Variation in Capacity and Delay Estimates from Microscopic Traffic Simulation Models. Transportation Research Record. Vol. 1802. S. 23-31. ISSN 0361-1981.

Tiehallinto. 2001. Tasoliittymät. Helsinki: Tiehallinto, tie- ja liikennetekniikka. ISBN 951-726-731.

Tiehallinto. 2003a. IVAR-ohjelmiston käyttöopas. Helsinki: Tiehallinto, tekniset palvelut. Suunnitteluvaiheen ohjaus. ISBN 951-803-066-9.

Tiehallinto. 2003b. Liikennetekninen mallintaminen - nykytila, kehityssuunnat ja mahdollisuudet. Helsinki: Tiehallinto, tekniset palvelut. Tiehallinnon selvityksiä 28/2003. ISBN 951-803-076-6.

Tiehallinto. 2005. Liikennevalojen suunnittelu, LIVASU. Helsinki: Tiehallinto, asiantuntijapalvelut. ISBN 951-803-630-6.

Tiehallinto. 2006. Perusverkon eritasoliittymät 2006. Suunnitteluohje. Luonnos.

Trafficware. 2006. Synchro Studio 7. Traffic Signal Software - User Guide. Trafficware Ltd.

Transportation Research Board. 2010. Highway Capacity Manual. Washington D.C., USA: National Research Council. ISBN 978-0-309-16077-3.

Transportation Research Board. 2014. Traffic delays. Transportation Research Thesaurus. [Viitattu 6.10.2014] Saatavissa: <http://trt.trb.org/trt.asp?NN=Bthd>

Troutbeck, R.J. & Brilon, W. 2002. Unsignalized Intersection Theory. Teoksessa: Gartner, N., Rathi, A. & Messer, J. (toim.) Revised Monograph on Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. [Viitattu 3.12.2014] Saatavissa: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/>

Liiteluettelo

Liite 1. Nelihaaraliittymien simuloinneissa käytetyt liikennemäärät. 2 sivua.

Liite 2. Kolmihaaraliittymien simuloinneissa käytetyt liikennemäärät. 2 sivua.

Liite 3. Regressioanalyysien tulokset pääsuunnille. 17 sivua.

Liite 4. Neliöfunktioilla saadut regressioanalyysien tulokset sivusuunnille. 13 sivua.

Liite 5. Eksponenttifunktioilla saadut regressioanalyysien tulokset sivusuunnille. 7 sivua.

Liite 6. Liittymätyyppien keskimääräiset viivytykset sivusuuntien eri osuuksilla pääsuunnista. 13 sivua.

Liite 1. Nelihaaraliittymien simuloinneissa käytetyt liikennemäärät

Simulointi- ajo	Tunti	KVL		LIIKENNEMÄÄRÄ (ajon/h)		SAAPUVA LIIKENNE			
		Pääs.	Sivus.	Pääs.	Sivus.	S. 1	S. 2	S. 3	S. 4
1	10% KVL	2000	100	200	10	100	5	100	5
2	10% KVL	2000	100	200	10	100	5	100	5
3	10% KVL	2000	100	200	10	100	5	100	5
1	10% KVL	2000	200	200	20	100	10	100	10
2	10% KVL	2000	200	200	20	100	10	100	10
3	10% KVL	2000	200	200	20	100	10	100	10
1	10% KVL	2000	400	200	40	100	20	100	20
2	10% KVL	2000	400	200	40	100	20	100	20
3	10% KVL	2000	400	200	40	100	20	100	20
1	10% KVL	2000	800	200	80	100	40	100	40
2	10% KVL	2000	800	200	80	100	40	100	40
3	10% KVL	2000	800	200	80	100	40	100	40
1	10% KVL	4000	200	400	15	150	7,5	150	7,5
2	10% KVL	4000	200	400	15	150	7,5	150	7,5
3	10% KVL	4000	200	400	15	150	7,5	150	7,5
1	10% KVL	4000	400	400	30	150	15	150	15
2	10% KVL	4000	400	400	30	150	15	150	15
3	10% KVL	4000	400	400	30	150	15	150	15
1	10% KVL	4000	800	400	60	150	30	150	30
2	10% KVL	4000	800	400	60	150	30	150	30
3	10% KVL	4000	800	400	60	150	30	150	30
1	10% KVL	4000	1600	400	120	150	60	150	60
2	10% KVL	4000	1600	400	120	150	60	150	60
3	10% KVL	4000	1600	400	120	150	60	150	60
1	15% KVL	4000	200	600	20	200	10	200	10
2	15% KVL	4000	200	600	20	200	10	200	10
3	15% KVL	4000	200	600	20	200	10	200	10
1	15% KVL	4000	400	600	40	200	20	200	20
2	15% KVL	4000	400	600	40	200	20	200	20
3	15% KVL	4000	400	600	40	200	20	200	20
1	15% KVL	4000	800	600	80	200	40	200	40
2	15% KVL	4000	800	600	80	200	40	200	40
3	15% KVL	4000	800	600	80	200	40	200	40
1	15% KVL	4000	1600	600	160	200	80	200	80
2	15% KVL	4000	1600	600	160	200	80	200	80
3	15% KVL	4000	1600	600	160	200	80	200	80
1	8% KVL	10000	500	800	25	250	12,5	250	12,5
2	8% KVL	10000	500	800	25	250	12,5	250	12,5
3	8% KVL	10000	500	800	25	250	12,5	250	12,5
1	8% KVL	10000	1000	800	50	250	25	250	25

2	8% KVL	10000	1000	800	50	250	25	250	25
3	8% KVL	10000	1000	800	50	250	25	250	25
1	8% KVL	10000	2000	800	100	250	50	250	50
2	8% KVL	10000	2000	800	100	250	50	250	50
3	8% KVL	10000	2000	800	100	250	50	250	50
1	8% KVL	10000	4000	800	200	250	100	250	100
2	8% KVL	10000	4000	800	200	250	100	250	100
3	8% KVL	10000	4000	800	200	250	100	250	100
1	10% KVL	10000	500	1000	30	300	15	300	15
2	10% KVL	10000	500	1000	30	300	15	300	15
3	10% KVL	10000	500	1000	30	300	15	300	15
1	10% KVL	10000	1000	1000	60	300	30	300	30
2	10% KVL	10000	1000	1000	60	300	30	300	30
3	10% KVL	10000	1000	1000	60	300	30	300	30
1	10% KVL	10000	2000	1000	120	300	60	300	60
2	10% KVL	10000	2000	1000	120	300	60	300	60
3	10% KVL	10000	2000	1000	120	300	60	300	60
1	10% KVL	10000	4000	1000	240	300	120	300	120
2	10% KVL	10000	4000	1000	240	300	120	300	120
3	10% KVL	10000	4000	1000	240	300	120	300	120
1	12% KVL	10000	500	1200	50	500	25	500	25
2	12% KVL	10000	500	1200	50	500	25	500	25
3	12% KVL	10000	500	1200	50	500	25	500	25
1	12% KVL	10000	1000	1200	100	500	50	500	50
2	12% KVL	10000	1000	1200	100	500	50	500	50
3	12% KVL	10000	1000	1200	100	500	50	500	50
1	12% KVL	10000	2000	1200	200	500	100	500	100
2	12% KVL	10000	2000	1200	200	500	100	500	100
3	12% KVL	10000	2000	1200	200	500	100	500	100
1	12% KVL	10000	4000	1200	400	500	200	500	200
2	12% KVL	10000	4000	1200	400	500	200	500	200
3	12% KVL	10000	4000	1200	400	500	200	500	200
1	15% KVL	10000	500	1500	75	750	37,5	750	37,5
2	15% KVL	10000	500	1500	75	750	37,5	750	37,5
3	15% KVL	10000	500	1500	75	750	37,5	750	37,5
1	15% KVL	10000	1000	1500	150	750	75	750	75
2	15% KVL	10000	1000	1500	150	750	75	750	75
3	15% KVL	10000	1000	1500	150	750	75	750	75
1	15% KVL	10000	2000	1500	300	750	150	750	150
2	15% KVL	10000	2000	1500	300	750	150	750	150
3	15% KVL	10000	2000	1500	300	750	150	750	150
1	15% KVL	10000	4000	1500	600	750	300	750	300
2	15% KVL	10000	4000	1500	600	750	300	750	300
3	15% KVL	10000	4000	1500	600	750	300	750	300

Liite 2. Kolmihaaraliittymien simuloinneissa käytetyt liikennemäärät

Simulointi- ajo	Tunti	KVL		LIIKENNEMÄÄRÄ (ajon/h)		SAAPUVA LIIKENNE		
		Pääs.	Sivus.	Pääs.	Sivus.	S. 1	S. 2	S.3
1	10% KVL	2000	200	200	20	100	10	100
2	10% KVL	2000	200	200	20	100	10	100
3	10% KVL	2000	200	200	20	100	10	100
1	5% KVL	4000	800	200	40	100	20	100
2	5% KVL	4000	800	200	40	100	20	100
3	5% KVL	4000	800	200	40	100	20	100
1	10% KVL	2000	400	200	40	100	20	100
2	10% KVL	2000	400	200	40	100	20	100
3	10% KVL	2000	400	200	40	100	20	100
1	10% KVL	2000	800	200	80	100	40	100
2	10% KVL	2000	800	200	80	100	40	100
3	10% KVL	2000	800	200	80	100	40	100
1	10% KVL	2000	1600	200	160	100	80	100
2	10% KVL	2000	1600	200	160	100	80	100
3	10% KVL	2000	1600	200	160	100	80	100
1	10% KVL	4000	400	400	40	200	20	200
2	10% KVL	4000	400	400	40	200	20	200
3	10% KVL	4000	400	400	40	200	20	200
1	10% KVL	4000	800	400	80	200	40	200
2	10% KVL	4000	800	400	80	200	40	200
3	10% KVL	4000	800	400	80	200	40	200
1	10% KVL	4000	1600	400	160	200	80	200
2	10% KVL	4000	1600	400	160	200	80	200
3	10% KVL	4000	1600	400	160	200	80	200
1	10% KVL	4000	3200	400	320	200	160	200
2	10% KVL	4000	3200	400	320	200	160	200
3	10% KVL	4000	3200	400	320	200	160	200
1	15% KVL	4000	400	600	60	300	30	300
2	15% KVL	4000	400	600	60	300	30	300
3	15% KVL	4000	400	600	60	300	30	300
1	15% KVL	4000	800	600	120	300	60	300
2	15% KVL	4000	800	600	120	300	60	300
3	15% KVL	4000	800	600	120	300	60	300
1	15% KVL	4000	1600	600	240	300	120	300
2	15% KVL	4000	1600	600	240	300	120	300
3	15% KVL	4000	1600	600	240	300	120	300
1	15% KVL	4000	3200	600	480	300	240	300
2	15% KVL	4000	3200	600	480	300	240	300
3	15% KVL	4000	3200	600	480	300	240	300
1	8% KVL	10000	1000	800	80	400	40	400

2	8% KVL	10000	1000	800	80	400	40	400
3	8% KVL	10000	1000	800	80	400	40	400
1	8% KVL	10000	2000	800	160	400	80	400
2	8% KVL	10000	2000	800	160	400	80	400
3	8% KVL	10000	2000	800	160	400	80	400
1	8% KVL	10000	4000	800	320	400	160	400
2	8% KVL	10000	4000	800	320	400	160	400
3	8% KVL	10000	4000	800	320	400	160	400
1	8% KVL	10000	8000	800	640	400	320	400
2	8% KVL	10000	8000	800	640	400	320	400
3	8% KVL	10000	8000	800	640	400	320	400
1	10% KVL	10000	1000	1000	100	500	50	500
2	10% KVL	10000	1000	1000	100	500	50	500
3	10% KVL	10000	1000	1000	100	500	50	500
1	10% KVL	10000	2000	1000	200	500	100	500
2	10% KVL	10000	2000	1000	200	500	100	500
3	10% KVL	10000	2000	1000	200	500	100	500
1	10% KVL	10000	4000	1000	400	500	200	500
2	10% KVL	10000	4000	1000	400	500	200	500
3	10% KVL	10000	4000	1000	400	500	200	500
1	10% KVL	10000	8000	1000	800	500	400	500
2	10% KVL	10000	8000	1000	800	500	400	500
3	10% KVL	10000	8000	1000	800	500	400	500
1	12% KVL	10000	1000	1200	120	600	60	600
2	12% KVL	10000	1000	1200	120	600	60	600
3	12% KVL	10000	1000	1200	120	600	60	600
1	12% KVL	10000	2000	1200	240	600	120	600
2	12% KVL	10000	2000	1200	240	600	120	600
3	12% KVL	10000	2000	1200	240	600	120	600
1	12% KVL	10000	4000	1200	480	600	240	600
2	12% KVL	10000	4000	1200	480	600	240	600
3	12% KVL	10000	4000	1200	480	600	240	600
1	12% KVL	10000	8000	1200	960	600	480	600
2	12% KVL	10000	8000	1200	960	600	480	600
3	12% KVL	10000	8000	1200	960	600	480	600
1	15% KVL	10000	1000	1500	150	750	75	750
2	15% KVL	10000	1000	1500	150	750	75	750
3	15% KVL	10000	1000	1500	150	750	75	750
1	15% KVL	10000	2000	1500	300	750	150	750
2	15% KVL	10000	2000	1500	300	750	150	750
3	15% KVL	10000	2000	1500	300	750	150	750
1	15% KVL	10000	4000	1500	600	750	300	750
2	15% KVL	10000	4000	1500	600	750	300	750
3	15% KVL	10000	4000	1500	600	750	300	750
1	15% KVL	10000	8000	1500	1200	750	600	750
2	15% KVL	10000	8000	1500	1200	750	600	750
3	15% KVL	10000	8000	1500	1200	750	600	750

Liite 3. Regressioanalyysien tulokset pääsuunnille

4-haara, kanavoimaton:

Model Summary

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,983 ^a	,967	,967	,233949

a. Predictors: ss2, ps2, ss

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	266,502	3	88,834	1623,071	,000 ^c
	Residual	9,031	165	,055		
	Total	275,532 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2, ss

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ss	,004	,000	,676	13,757	,000
	ps2	,000	,000	-,109	-4,492	,000
	ss2	,006	,001	,405	10,176	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, kanavoitu:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,949 ^a	,900	,897	,312366

a. Predictors: psss, ps, ps2, ss, ss2

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	142,844	5	28,569	292,795	,000 ^c
	Residual	15,904	163	,098		
	Total	158,748 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: psss, ps, ps2, ss, ss2

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,000	,000	-,368	-2,889	,004
	ss	,008	,001	1,403	11,006	,000
	ps2	,001	,000	,665	4,605	,000
	ss2	,007	,002	,590	3,547	,001
	psss	-,006	,001	-1,282	-5,132	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, valo-ohjauksinen:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,977 ^a	,954	,953	1,374476

a. Predictors: (Constant), ss2, ps, ss, ps2

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	6389,705	4	1597,426	845,564	,000 ^b
	Residual	307,937	163	1,889		
	Total	6697,642	167			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Predictors: (Constant), ss2, ps, ss, ps2

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	2,730	,401		6,807	,000
	ps	-,004	,001	-,237	-2,678	,008
	ss	,052	,003	1,065	19,166	,000
	ps2	,004	,001	,425	4,909	,000
	ss2	-,020	,005	-,228	-4,332	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

4-haara, kierto:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,932 ^a	,869	,866	,937479

a. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	953,317	3	317,772	361,571	,000 ^b
	Residual	144,134	164	,879		
	Total	1097,451	167			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	8,262	,135		60,994	,000
	ss	-,006	,002	-,294	-3,405	,001
	ps2	,002	,000	,456	12,910	,000
	ss2	,032	,003	,884	10,663	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

4-haara, porrastettu:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,932 ^a	,868	,866	1,361913

a. Predictors: ss2, ps2

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2019,726	2	1009,863	544,457	,000 ^c
	Residual	307,898	166	1,855		
	Total	2327,624 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps2	,000	,000	,106	2,886	,004
	ss2	,035	,001	,860	23,320	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, stop:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,958 ^a	,918	,916	,280391

a. Predictors: ss2, ps, ps2, ss

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	144,038	4	36,010	458,027	,000 ^c
	Residual	12,894	164	,079		
	Total	156,932 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps, ps2, ss

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,000	,000	,343	2,676	,008
	ss	,006	,001	1,311	11,067	,000
	ps2	,000	,000	-,563	-5,506	,000
	ss2	-,002	,001	-,230	-2,553	,012

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, eritaso 1-ramppinen:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,958 ^a	,918	,916	,668794

a. Predictors: ps2, ss, ps

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	821,983	3	273,994	612,571	,000 ^c
	Residual	73,802	165	,447		
	Total	895,785 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ps2, ss, ps

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,001	,000	,373	4,149	,000
	ss	,011	,000	,985	25,648	,000
	ps2	-,001	,000	-,431	-5,115	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, eritaso, silmukkarampit:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,968 ^a	,938	,936	,293071

a. Predictors: ss2, ps, ps2, ss

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	213,067	4	53,267	620,171	,000 ^c
	Residual	14,086	164	,086		
	Total	227,153 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps, ps2, ss

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,000	,000	,294	2,643	,009
	ss	,008	,001	1,458	14,166	,000
	ps2	-,001	,000	-,498	-5,607	,000
	ss2	-,005	,001	-,393	-5,028	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, eritaso, rombiset rampit:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,969 ^a	,940	,939	,439265

a. Predictors: ps2, ss, ps

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	496,235	3	165,412	857,262	,000 ^c
	Residual	31,837	165	,193		
	Total	528,073 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ps2, ss, ps

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,004	,000	1,876	24,406	,000
	ss	,002	,000	,267	8,135	,000
	ps2	-,002	,000	-1,239	-17,197	,000

a. Dependent Variable: viive_ps

b. Linear Regression through the Origin

3-haara, kanavoimaton: suunta 1**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,957 ^a	,917	,913	2,256697

a. Predictors: ss2, ps, ss

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	4532,058	3	1510,686	296,639	,000 ^c
	Residual	412,507	81	5,093		
	Total	4944,565 ^d	84			

a. Dependent Variable: viive_s1

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps, ss

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,001	,001	,141	2,041	,044
	ss	-,006	,003	-,330	-2,300	,024
	ss2	,024	,002	1,172	11,020	,000

a. Dependent Variable: viive_s1

b. Linear Regression through the Origin

3-haara, kanavoimaton: suunta 3**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,974 ^a	,948	,946	,370738

a. Predictors: ps2, ss, ps

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	204,083	3	68,028	494,938	,000 ^c
	Residual	11,133	81	,137		
	Total	215,216 ^d	84			

a. Dependent Variable: viive_s3

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ps2, ss, ps

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,001	,000	,370	3,637	,000
	ss	,004	,000	1,062	24,445	,000
	ps2	-,001	,000	-,512	-5,369	,000

a. Dependent Variable: viive_s3

b. Linear Regression through the Origin

3-haara, kanavoitu: suunta 1**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,980 ^a	,960	,958	,694741

a. Predictors: ss2, ps2, ss

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	934,902	3	311,634	645,653	,000 ^c
	Residual	39,096	81	,483		
	Total	973,998 ^d	84			

a. Dependent Variable: viive_s1

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2, ss

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ss	,008	,001	,941	12,127	,000
	ps2	-,001	,000	-,205	-5,333	,000
	ss2	,002	,001	,199	3,167	,002

a. Dependent Variable: viive_s1

b. Linear Regression through the Origin

3-haara, kanavoitu: suunta 3**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,972 ^a	,944	,942	,329306

a. Predictors: ss2, ps2, ss

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	147,708	3	49,236	454,031	,000 ^c
	Residual	8,784	81	,108		
	Total	156,492 ^d	84			

a. Dependent Variable: viive_s3

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2, ss

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ss	,006	,000	1,711	18,646	,000
	ps2	,000	,000	-,344	-7,574	,000
	ss2	-,002	,000	-,540	-7,264	,000

a. Dependent Variable: viive_s3

b. Linear Regression through the Origin

3-haara, valo-ohjauksinen: suunta 1**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,966 ^a	,933	,931	3,398860

a. Predictors: (Constant), ss2, ss

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	13035,588	2	6517,794	564,201	,000 ^b
	Residual	935,732	81	11,552		
	Total	13971,320	83			

a. Dependent Variable: viive_s1

b. Predictors: (Constant), ss2, ss

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	4,073	,750		5,429	,000
	ss	,014	,004	,307	3,308	,001
	ss2	,027	,004	,669	7,196	,000

a. Dependent Variable: viive_s1

3-haara, valo-ohjauksinen: suunta 3**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,986 ^a	,972	,971	1,257529

a. Predictors: (Constant), ss2, ps, ss, ps2

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	4360,755	4	1090,189	689,391	,000 ^b
	Residual	124,929	79	1,581		
	Total	4485,684	83			

a. Dependent Variable: viive_s3

b. Predictors: (Constant), ss2, ps, ss, ps2

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	3,454	,533		6,480	,000
	ps	-,006	,002	-,354	-3,892	,000
	ss	,036	,002	1,449	21,078	,000
	ps2	,004	,001	,429	4,817	,000
	ss2	-,012	,001	-,540	-8,182	,000

a. Dependent Variable: viive_s3

3-haara, kierto: suunta 1**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,976 ^a	,953	,952	,462855

a. Predictors: (Constant), ss2, ps2

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	353,640	2	176,820	825,356	,000 ^b
	Residual	17,353	81	,214		
	Total	370,993	83			

a. Dependent Variable: viive_s1

b. Predictors: (Constant), ss2, ps2

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	7,831	,077		101,739	,000
	ps2	,001	,000	,481	17,532	,000
	ss2	,004	,000	,649	23,644	,000

a. Dependent Variable: viive_s1

3-haara, kierto: suunta 3**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,948 ^a	,898	,895	1,500427

a. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1591,543	3	530,514	235,650	,000 ^b
	Residual	180,103	80	2,251		
	Total	1771,645	83			

a. Dependent Variable: viive_s3

b. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	7,148	,346		20,681	,000
	ss	-,009	,002	-,549	-4,607	,000
	ps2	,002	,000	,316	7,502	,000
	ss2	,018	,002	1,273	11,022	,000

a. Dependent Variable: viive_s3

Liite 4. Neliöfunktioilla saadut regressioanalyysien tulokset sivusuunnille

4-haara, kanavoimaton:

Model Summary

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,962 ^a	,925	,923	1,612614

a. Predictors: ss2, ps2, ss, ps

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	4881,070	4	1220,268	469,239	,000 ^c
	Residual	395,280	152	2,601		
	Total	5276,350 ^d	156			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2, ss, ps

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,002	,001	,363	2,821	,005
	ss	-,010	,004	-,312	-2,589	,011
	ps2	,002	,001	,386	3,984	,000
	ss2	,063	,008	,675	7,672	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, kanavoitu:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,923 ^a	,853	,850	3,141159

a. Predictors: ss2, ps2, ps

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	8916,322	3	2972,107	301,221	,000 ^c
	Residual	1539,233	156	9,867		
	Total	10455,556 ^d	159			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2, ps

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	-,002	,001	-,214	-2,398	,018
	ps2	,009	,001	,910	10,738	,000
	ss2	,071	,008	,332	8,735	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, valo-ohjauksinen:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,929 ^a	,863	,861	2,489146

a. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	5951,975	3	1983,992	320,213	,000 ^b
	Residual	941,769	152	6,196		
	Total	6893,744	155			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	11,526	,470		24,501	,000
	ss	-,018	,009	-,204	-1,995	,048
	ps2	,005	,000	,494	14,398	,000
	ss2	,246	,032	,779	7,633	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

4-haara, kierto:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,927 ^a	,860	,857	1,163262

a. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1358,412	3	452,804	334,623	,000 ^b
	Residual	221,921	164	1,353		
	Total	1580,333	167			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	5,529	,168		32,896	,000
	ss	-,011	,002	-,463	-5,173	,000
	ps2	,002	,000	,477	13,068	,000
	ss2	,043	,004	1,017	11,856	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

4-haara, porrastettu:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,816 ^a	,666	,659	15,598280

a. Predictors: ss2, ps2, ss

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	77019,224	3	25673,075	105,517	,000 ^c
	Residual	38685,709	159	243,306		
	Total	115704,932 ^d	162			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2, ss

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ss	-,080	,025	-,543	-3,170	,002
	ps2	,015	,002	,599	7,776	,000
	ss2	,372	,059	,880	6,255	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, stop:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,766 ^a	,587	,578	17,220607

a. Predictors: psss, ps2

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	37088,074	2	18544,037	62,533	,000 ^c
	Residual	26096,337	88	296,549		
	Total	63184,412 ^d	90			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: psss, ps2

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps2	,008	,003	,350	2,850	,005
	psss	,065	,018	,451	3,675	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, eritaso 1-ramppinen:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,924 ^a	,853	,851	4,883514

a. Predictors: ss2, ps2

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	22189,818	2	11094,909	465,221	,000 ^c
	Residual	3815,793	160	23,849		
	Total	26005,611 ^d	162			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps2	,008	,000	,634	17,059	,000
	ss2	,080	,007	,398	10,714	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, eritaso silmukkarampit:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,958 ^a	,918	,917	,835969

a. Predictors: ss2, ps, ps2

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1298,105	3	432,702	619,167	,000 ^c
	Residual	115,309	165	,699		
	Total	1413,415 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps, ps2

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,007	,000	2,083	24,850	,000
	ps2	-,003	,000	-1,305	-15,196	,000
	ss2	,004	,001	,116	3,989	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

4-haara, eritaso rombiset rampit:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,824 ^a	,679	,676	,319258

a. Predictors: ps2, ps

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	35,870	2	17,935	175,962	,000 ^c
	Residual	16,920	166	,102		
	Total	52,790 ^d	168			

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ps2, ps

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps	,001	,000	1,962	11,845	,000
	ps2	-,001	,000	-1,253	-7,563	,000

a. Dependent Variable: viive_ss

b. Linear Regression through the Origin

3-haara, kanavoimat:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,932 ^a	,868	,864	5,026469

a. Predictors: ss2, ps2

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	12124,916	2	6062,458	239,951	,000 ^c
	Residual	1844,374	73	25,265		
	Total	13969,290 ^d	75			

a. Dependent Variable: viive_s2

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ss2, ps2

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ps2	,009	,001	,657	13,471	,000
	ss2	,032	,004	,412	8,443	,000

a. Dependent Variable: viive_s2

b. Linear Regression through the Origin

3-haara, kanavoitu:**Model Summary**

Model	R	R Square ^b	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,921 ^a	,848	,844	5,839699

a. Predictors: ps2, ss

b. For regression through the origin (the no-intercept model), R Square measures the proportion of the variability in the dependent variable about the origin explained by regression. This CANNOT be compared to R Square for models which include an intercept.

ANOVA^{a,b}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	13923,363	2	6961,681	204,142	,000 ^c
	Residual	2489,453	73	34,102		
	Total	16412,815 ^d	75			

a. Dependent Variable: viive_s2

b. Linear Regression through the Origin

c. Predictors: ps2, ss

d. This total sum of squares is not corrected for the constant because the constant is zero for regression through the origin.

Coefficients^{a,b}

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	ss	,019	,003	,383	6,127	,000
	ps2	,010	,001	,615	9,836	,000

a. Dependent Variable: viive_s2

b. Linear Regression through the Origin

3-haara, valo-ohjauksinen:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,946 ^a	,895	,891	2,215212

a. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3094,468	3	1031,489	210,201	,000 ^b
	Residual	363,130	74	4,907		
	Total	3457,599	77			

a. Dependent Variable: viive_s2

b. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	13,665	,587		23,278	,000
	ss	,014	,005	,421	3,001	,004
	ps2	,003	,000	,310	7,351	,000
	ss2	,017	,006	,381	2,804	,006

a. Dependent Variable: viive_s2

3-haara, kierto:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,946 ^a	,895	,891	,667308

a. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	303,439	3	101,146	227,142	,000 ^b
	Residual	35,624	80	,445		
	Total	339,063	83			

a. Dependent Variable: viive_s2

b. Predictors: (Constant), ss2, ps2, ss

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	3,949	,154		25,689	,000
	ss	-,003	,001	-,487	-4,026	,000
	ps2	,001	,000	,529	12,360	,000
	ss2	,006	,001	1,041	8,864	,000

a. Dependent Variable: viive_s2

Liite 5. Eksponenttifunktioilla saadut regressio-analyysien tulokset sivusuunnille

4-haara, kanavoimaton:

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,930 ^a	,865	,863	,27166

a. Predictors: (Constant), ss, ps

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	72,472	2	36,236	490,995	,000 ^b
	Residual	11,291	153	,074		
	Total	83,763	155			

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

b. Predictors: (Constant), ss, ps

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,133	,048		-2,756	,007
	ps	,001	,000	,689	21,134	,000
	ss	,002	,000	,402	12,332	,000

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

4-haara, kanavoitu:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,947 ^a	,896	,895	,28562

a. Predictors: (Constant), ss, ps

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	109,515	2	54,758	671,215	,000 ^b
	Residual	12,726	156	,082		
	Total	122,242	158			

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

b. Predictors: (Constant), ss, ps

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,305	,043		-7,102	,000
	ps	,002	,000	,743	25,437	,000
	ss	,003	,000	,334	11,445	,000

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

4-haara, porrastettu:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,922 ^a	,850	,848	,36851

a. Predictors: (Constant), ss, ps

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	122,522	2	61,261	451,104	,000 ^b
	Residual	21,593	159	,136		
	Total	144,114	161			

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

b. Predictors: (Constant), ss, ps

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,433	,063		6,836	,000
	ps	,002	,000	,707	20,394	,000
	ss	,003	,000	,348	10,022	,000

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

4-haara, stop:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,859 ^a	,738	,735	,42775

a. Predictors: (Constant), ss, ps

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	82,031	2	41,016	224,162	,000 ^b
	Residual	29,093	159	,183		
	Total	111,124	161			

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

b. Predictors: (Constant), ss, ps

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,848	,074		11,525	,000
	ps	,001	,000	,572	12,476	,000
	ss	,003	,000	,428	9,332	,000

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

4-haara, eritaso 1-ramppinen:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,923 ^a	,853	,851	,27127

a. Predictors: (Constant), ss, ps

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	67,668	2	33,834	459,773	,000 ^b
	Residual	11,700	159	,074		
	Total	79,368	161			

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

b. Predictors: (Constant), ss, ps

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,694	,047		14,874	,000
	ps	,001	,000	,651	18,913	,000
	ss	,002	,000	,419	12,173	,000

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

3-haara, kanavoimaton:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,960 ^a	,922	,920	,30319

a. Predictors: (Constant), ss, ps

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	78,365	2	39,182	426,234	,000 ^b
	Residual	6,619	72	,092		
	Total	84,984	74			

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

b. Predictors: (Constant), ss, ps

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,324	,078		-4,152	,000
	ps	,002	,000	,693	19,668	,000
	ss	,003	,000	,462	13,124	,000

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

3-haara, kanavoitu:**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,958 ^a	,919	,916	,31162

a. Predictors: (Constant), ss, ps

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	78,967	2	39,483	406,600	,000 ^b
	Residual	6,992	72	,097		
	Total	85,958	74			

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

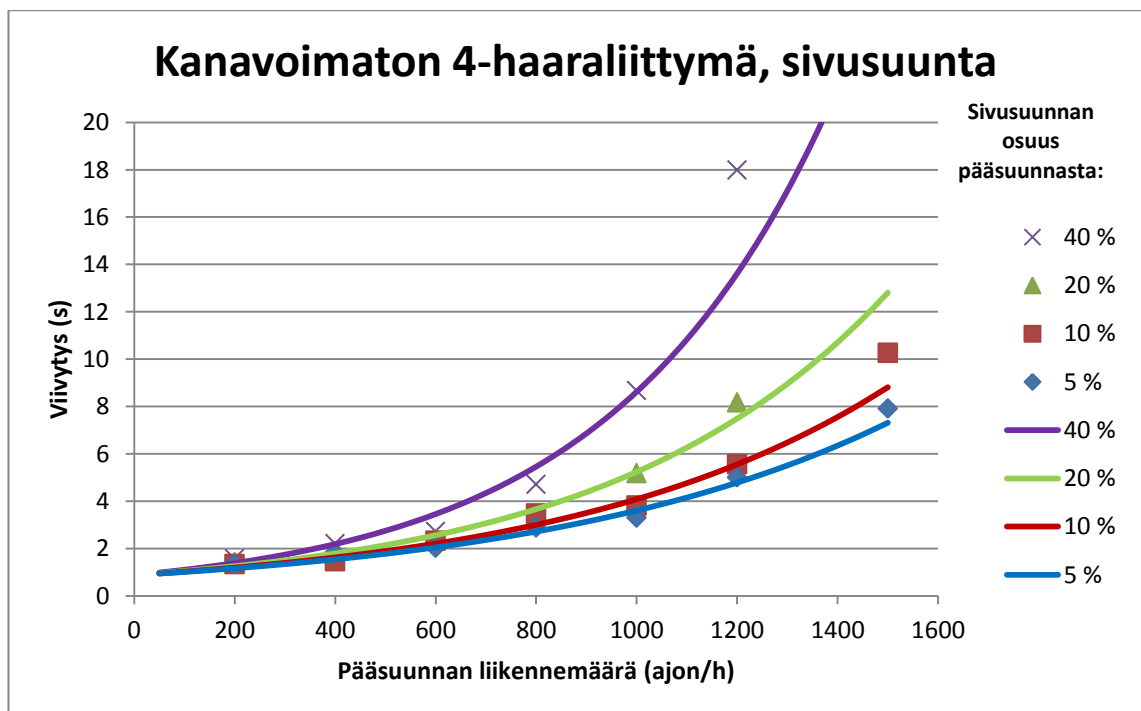
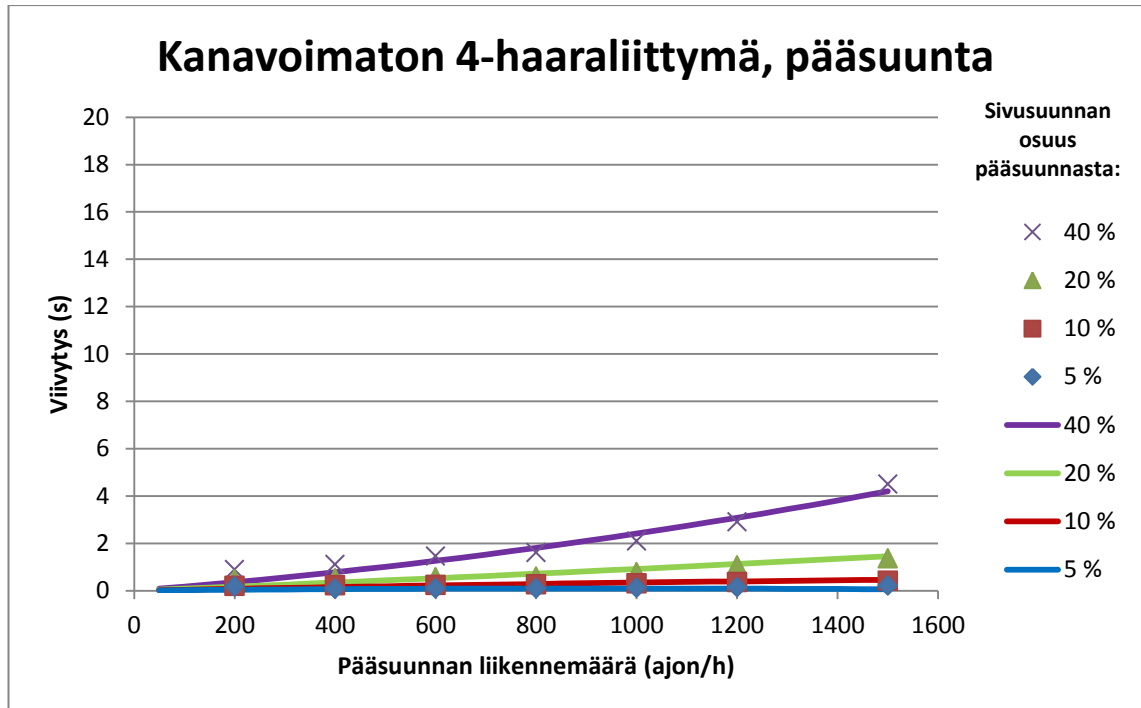
b. Predictors: (Constant), ss, ps

Coefficients^a

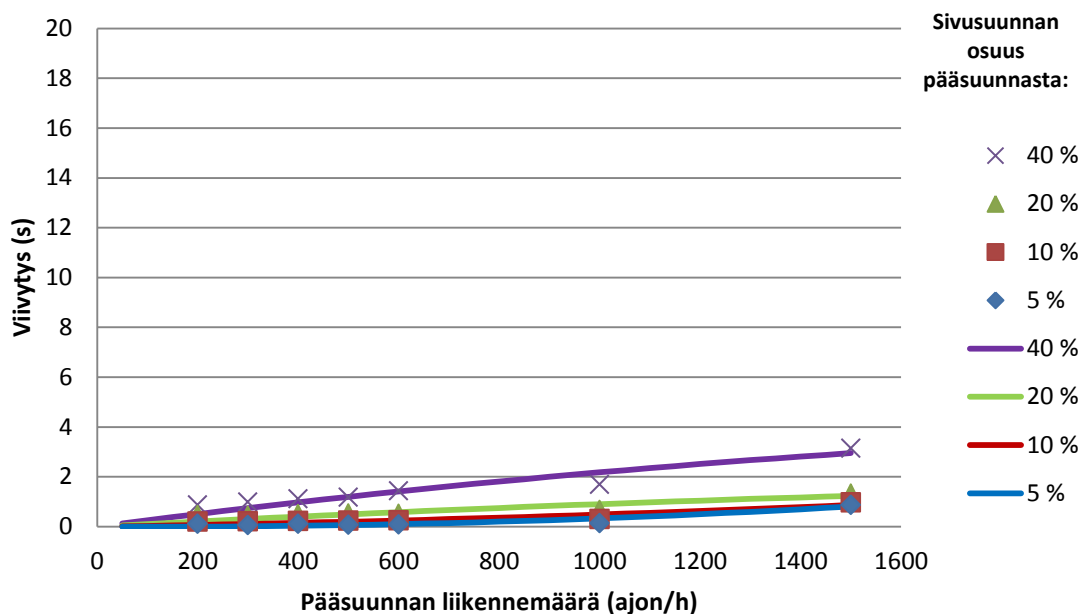
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,249	,080		-3,111	,003
	ps	,002	,000	,719	19,973	,000
	ss	,002	,000	,427	11,872	,000

a. Dependent Variable: ln_viive_ss

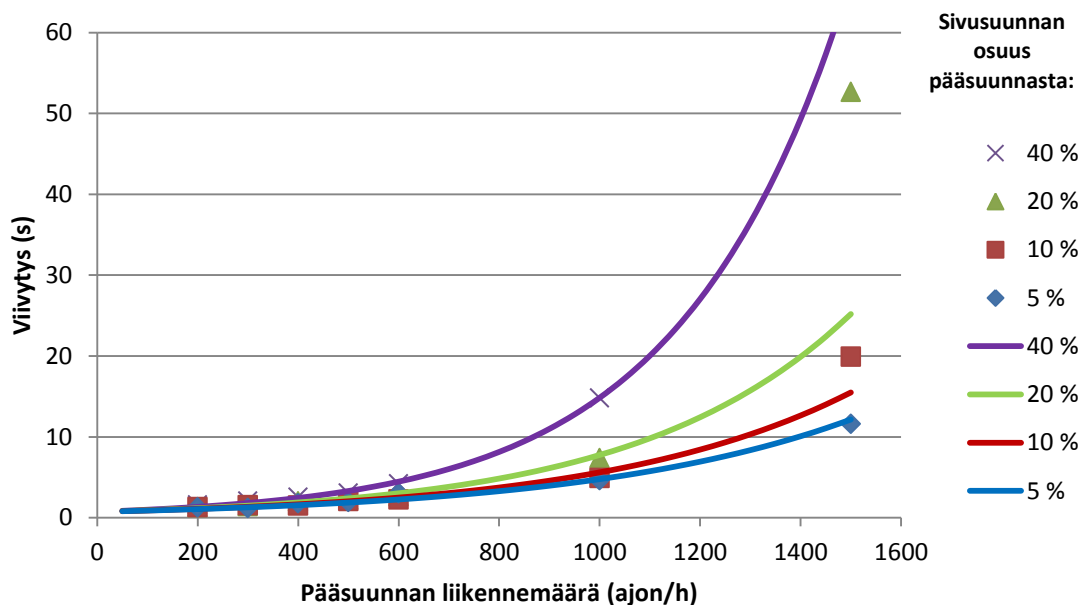
Liite 6. Liittymätyyppien keskimääräiset viivytykset sivusuuntien eri osuuksilla pääsuunnista



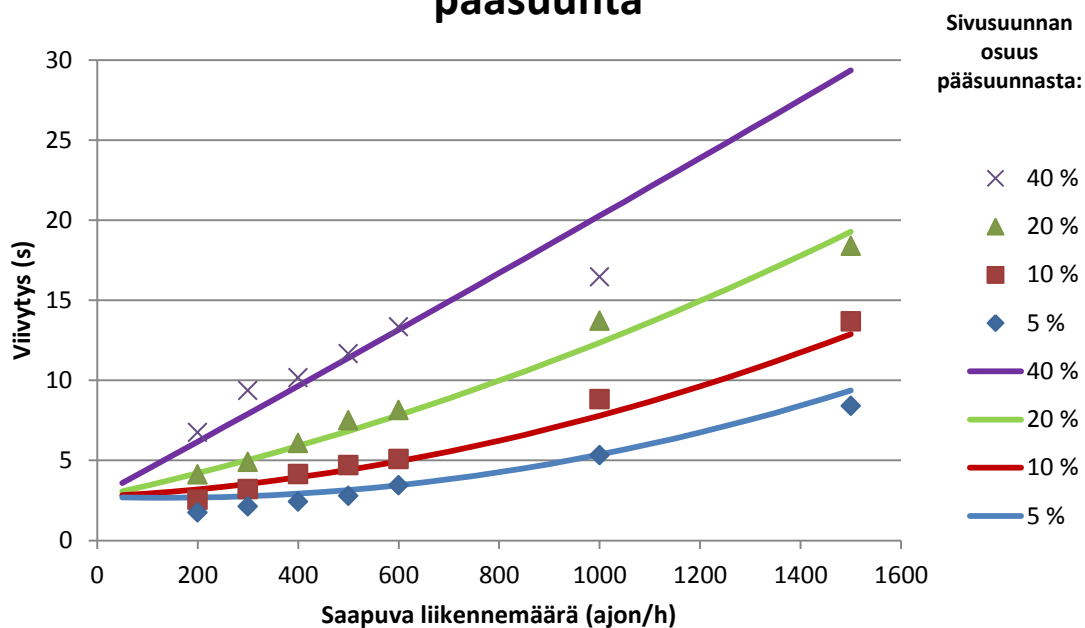
Kanavoitu 4-haaraliittymä, pääsuunta



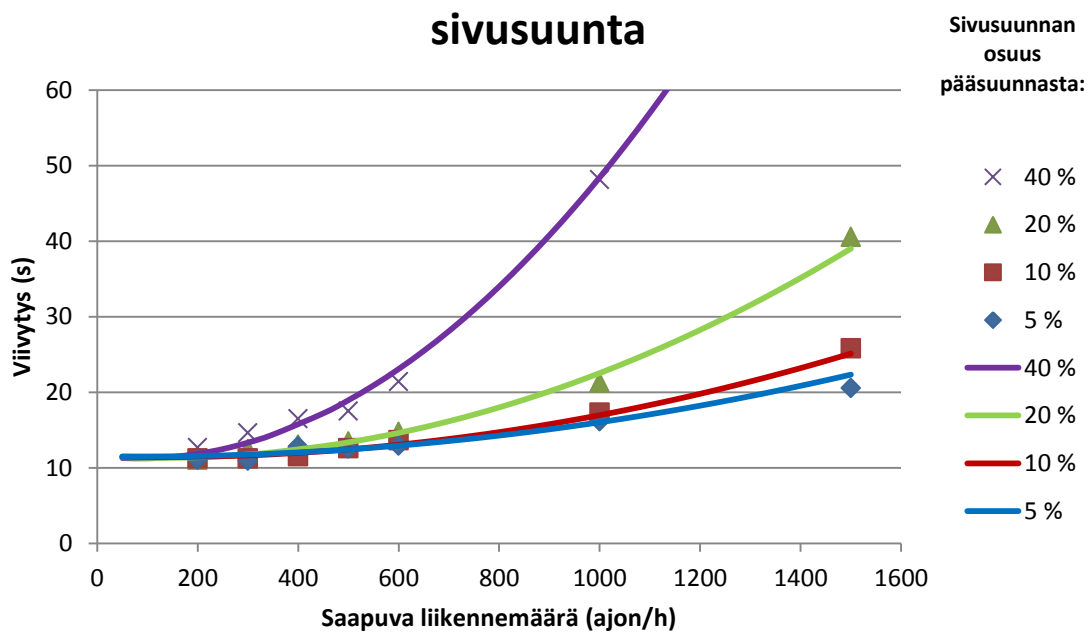
Kanavoitu 4-haaraliittymä, sivusuunta



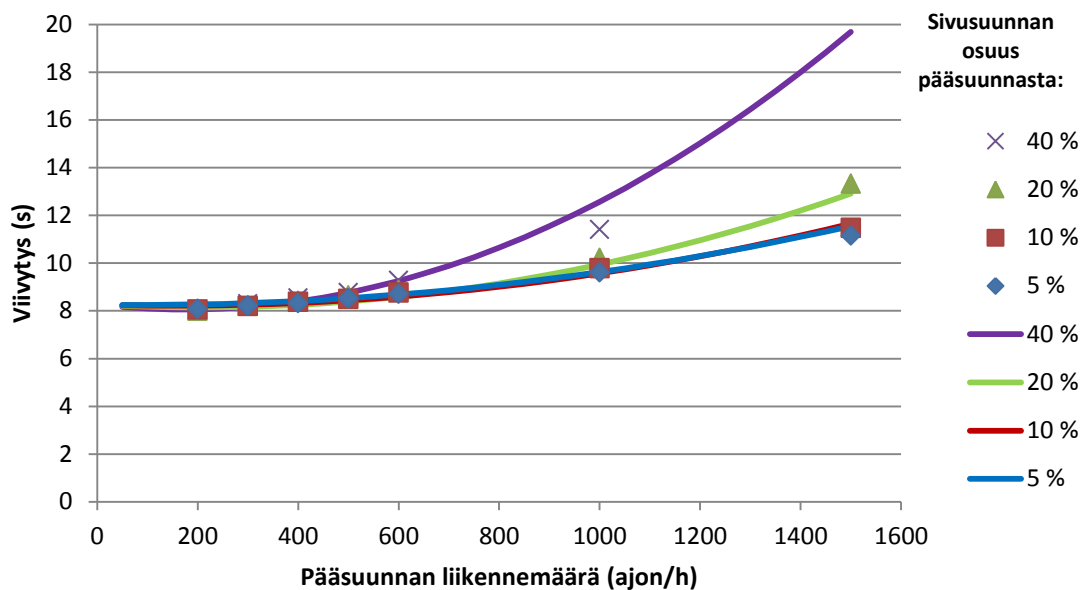
Valo-ohjauksinen 4-haaraliittymä, pääsuunta



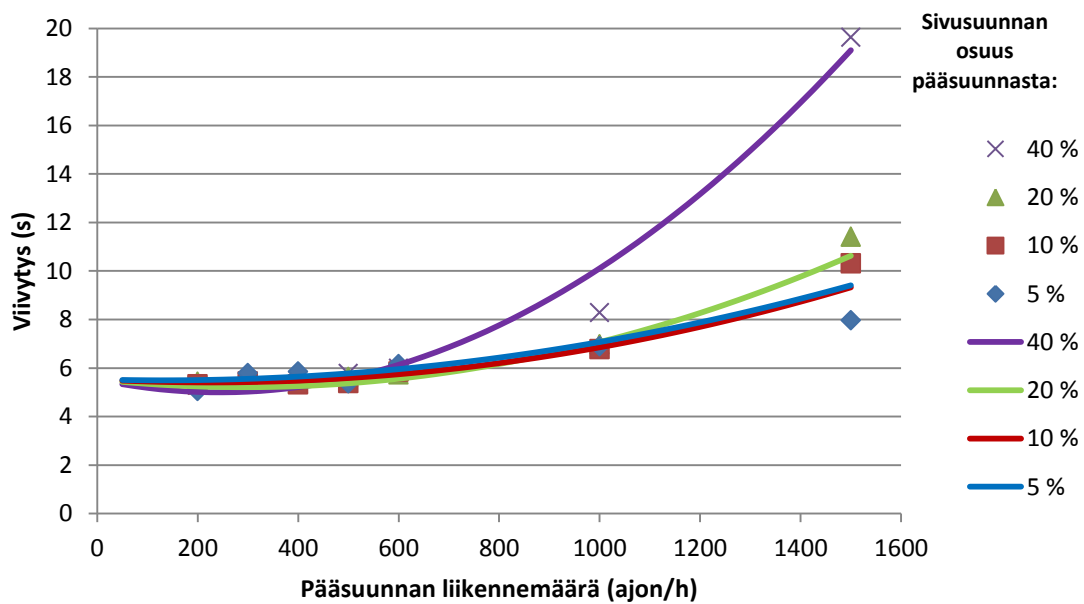
Valo-ohjauksinen 4-haaraliittymä, sivusuunta



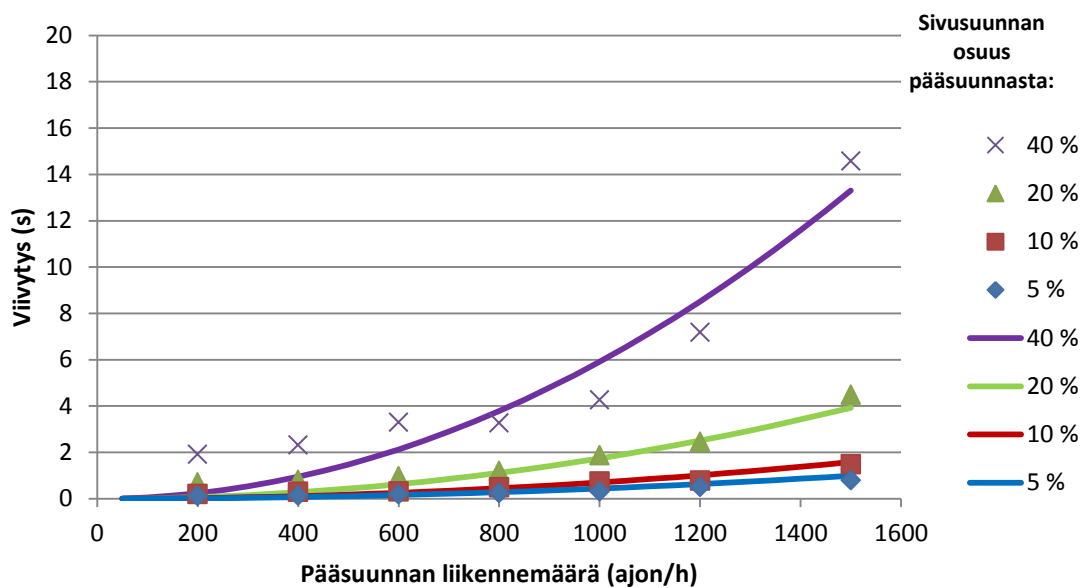
4-haarainen kiertoliittymä, pääsuunta



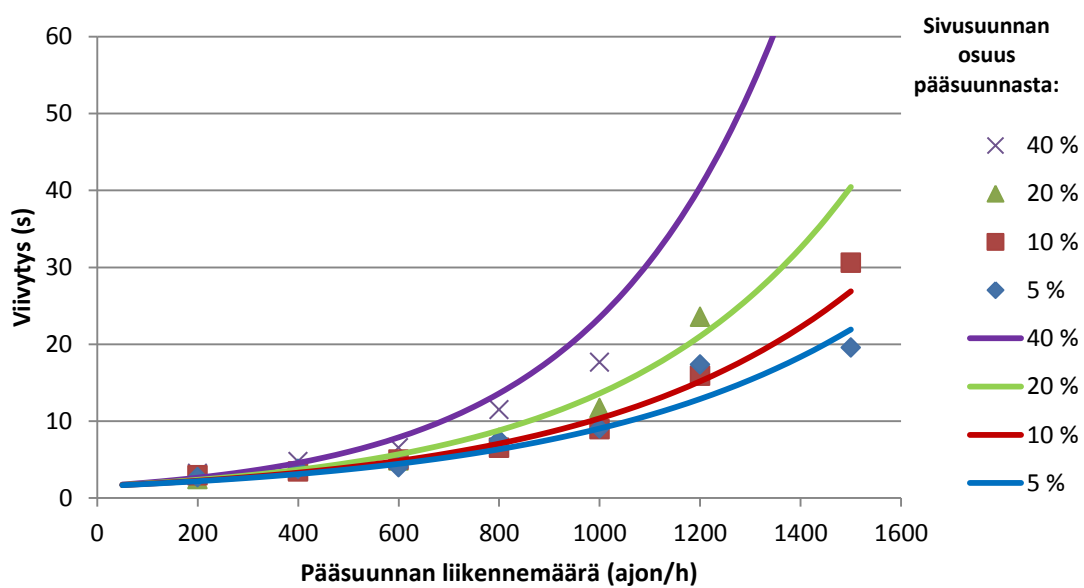
4-haarainen kiertoliittymä, sivusuunta



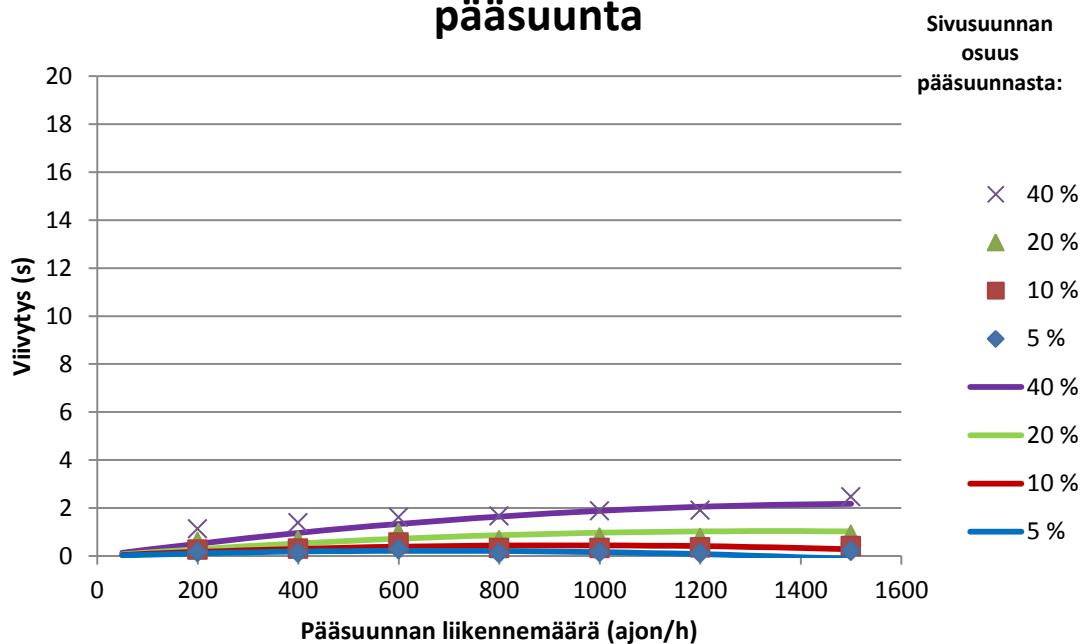
Porrastettu 4-haaraliittymä, pääsuunta



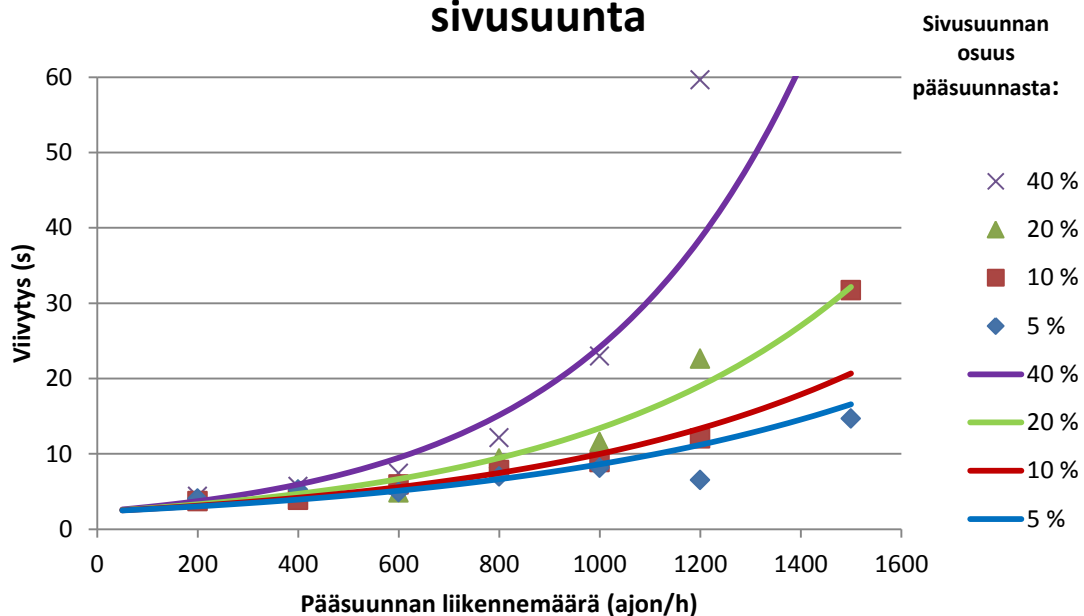
Porrastettu 4-haaraliittymä, sivusuunta



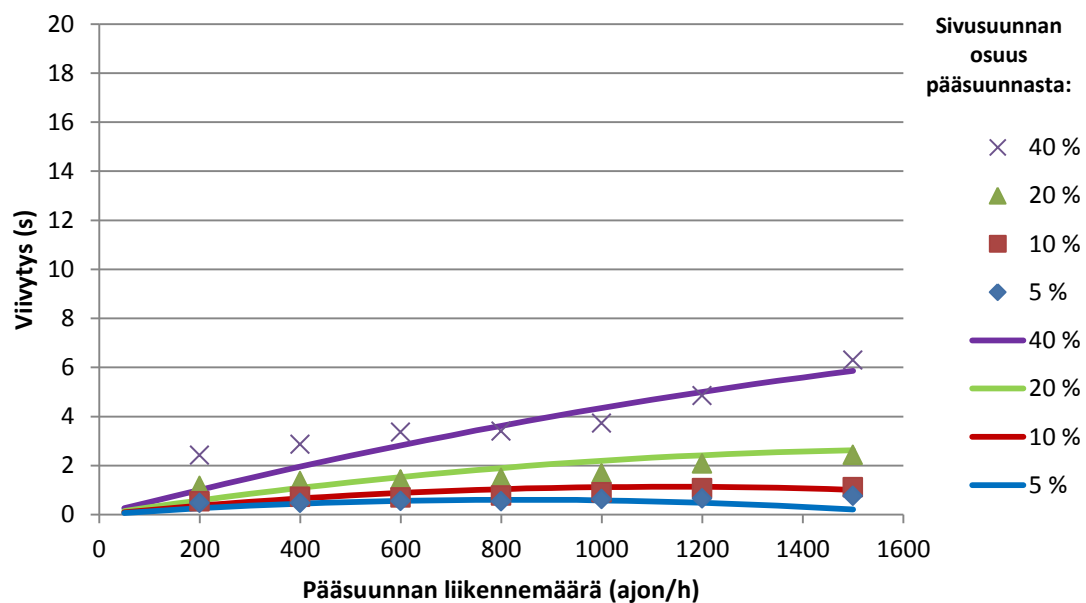
Pysähtymispakollinen 4-haaraliittymä, pääsuunta



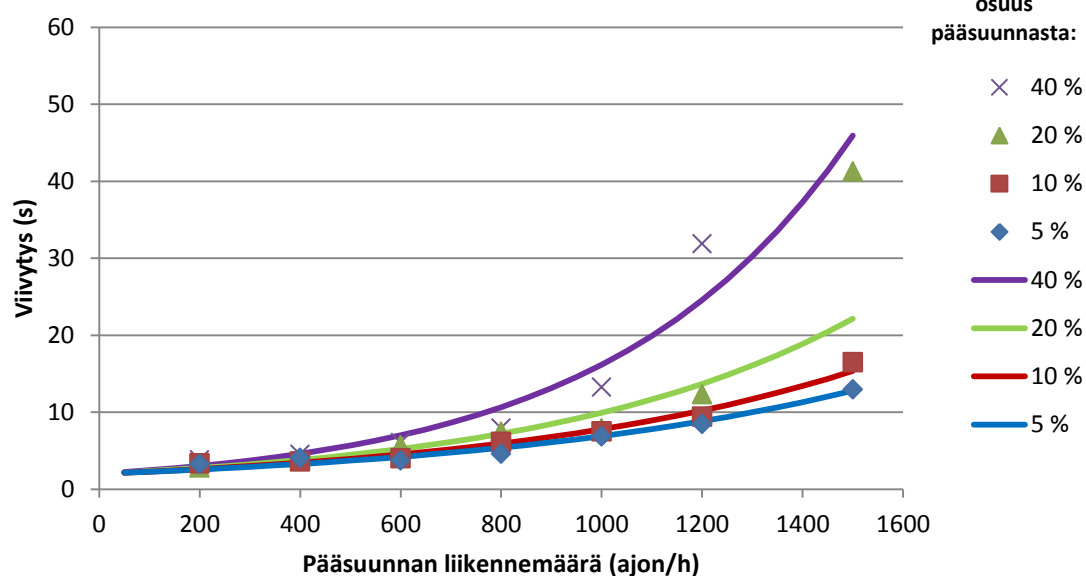
Pysähtymispakollinen 4-haaraliittymä, sivusuunta



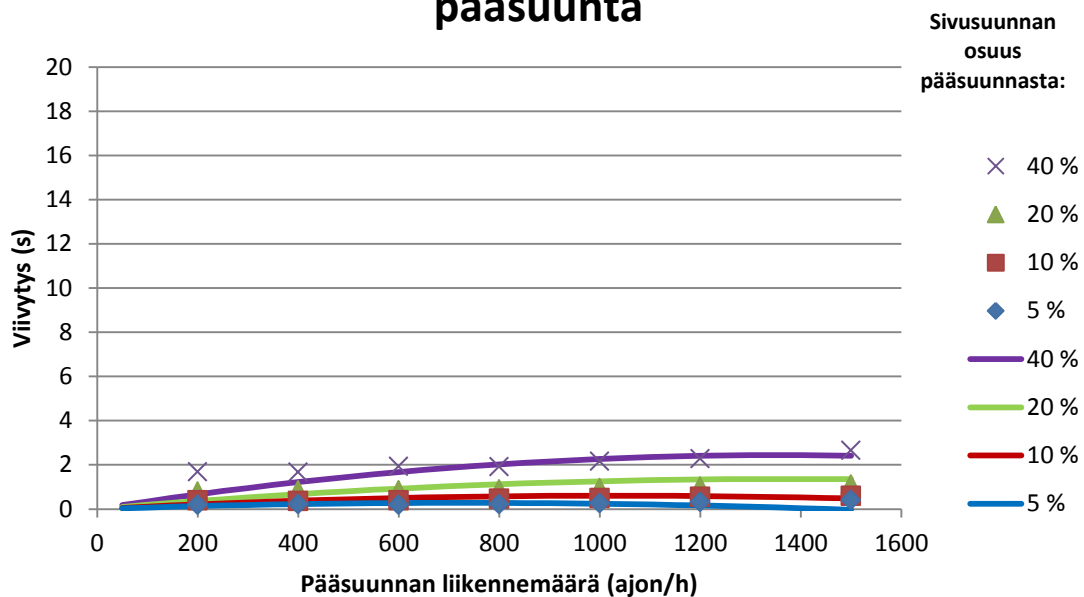
1-ramppinen eritasoliittymä, pääsuunta



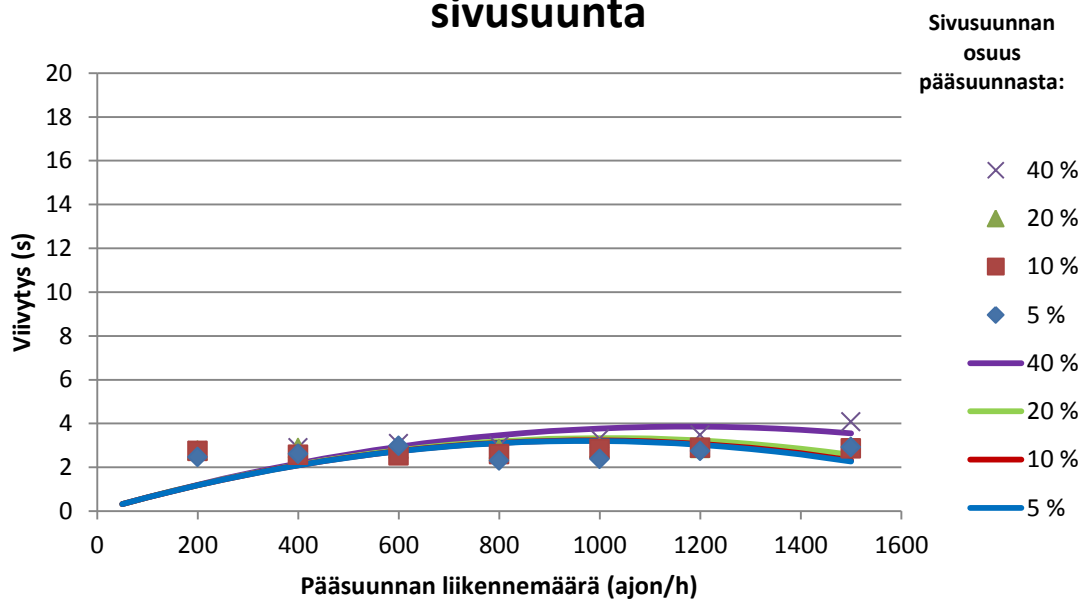
1-ramppinen eritasoliittymä, sivusuunta



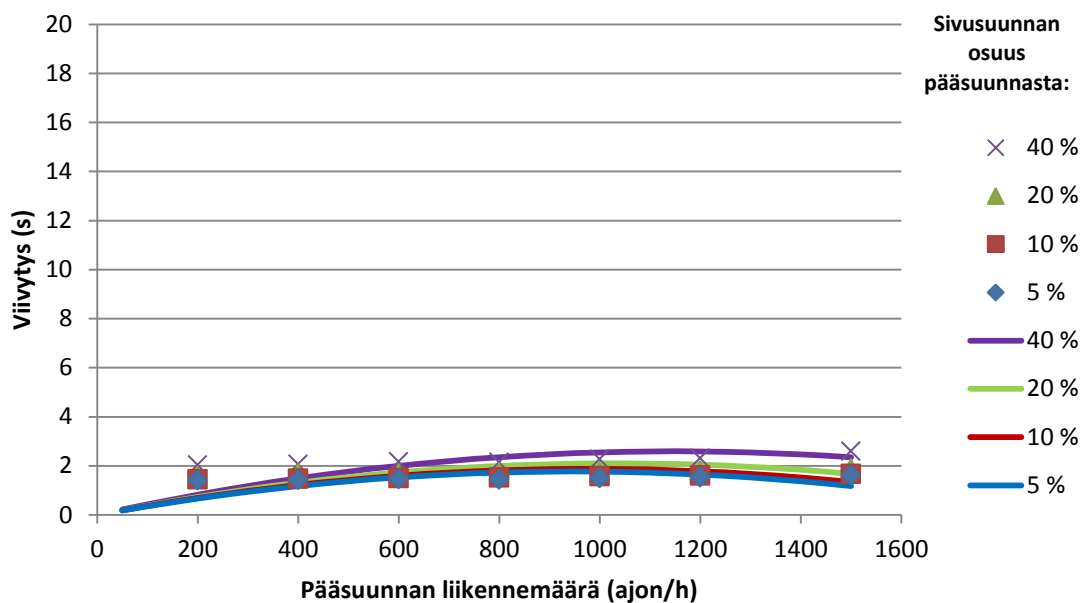
Silmukkarampillinen eritasoliittymä, pääsuunta



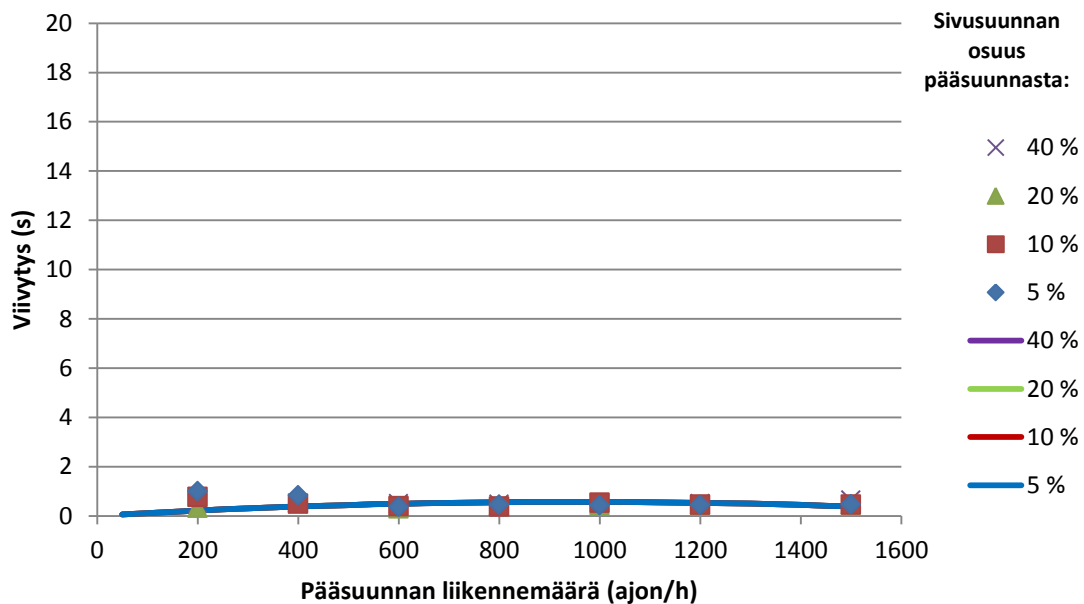
Silmukkarampillinen eritasoliittymä, sivusuunta



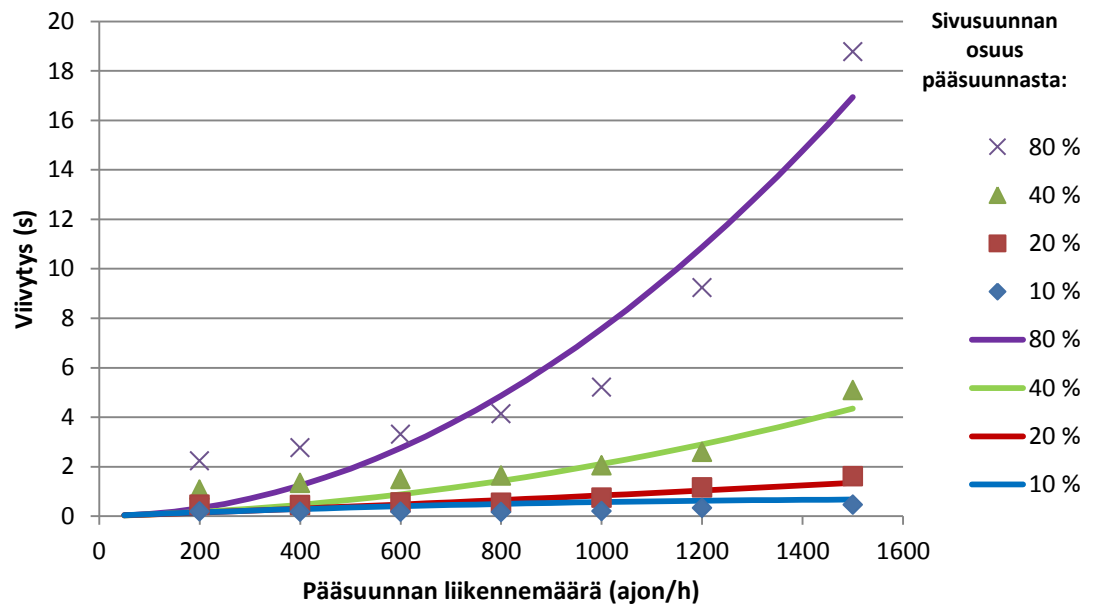
Rombinen eritasoliittymä, pääsuunta



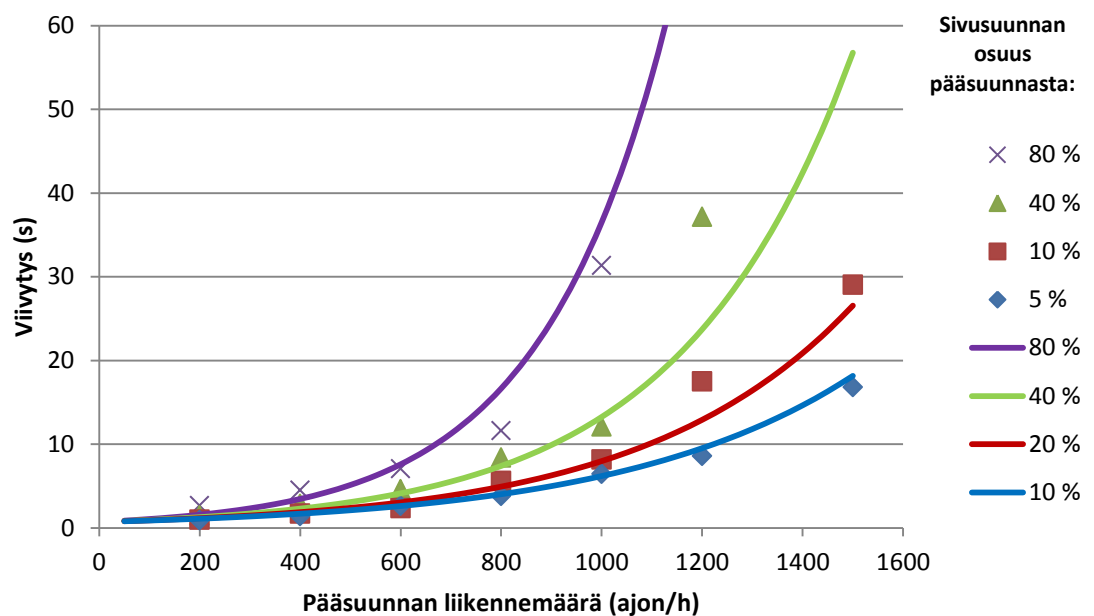
Rombinen eritasoliittymä, sivusuunta



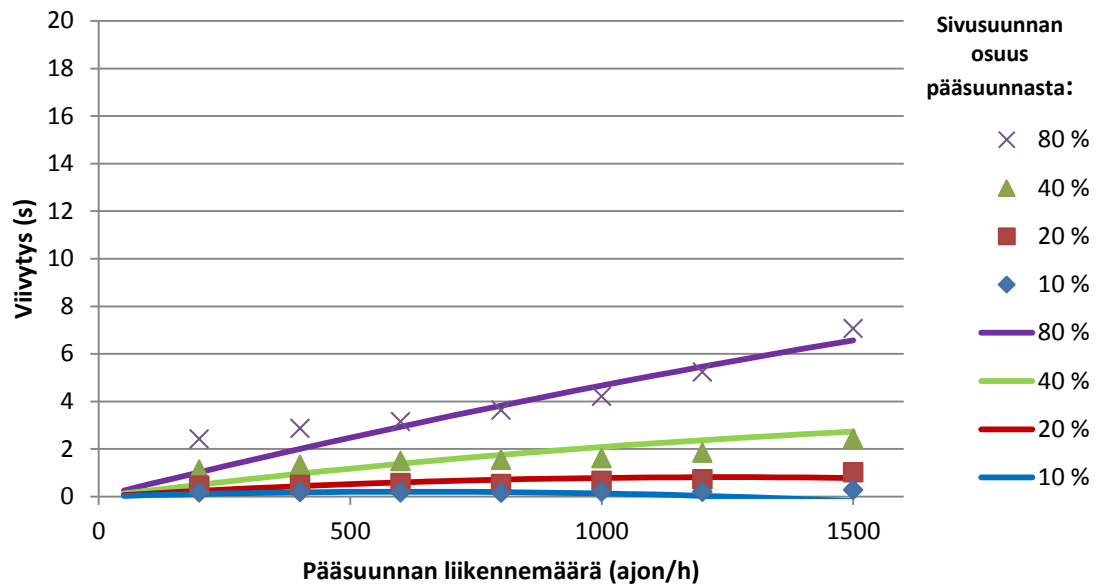
Kanavoimaton 3-haaraliittymä, pääsuunta



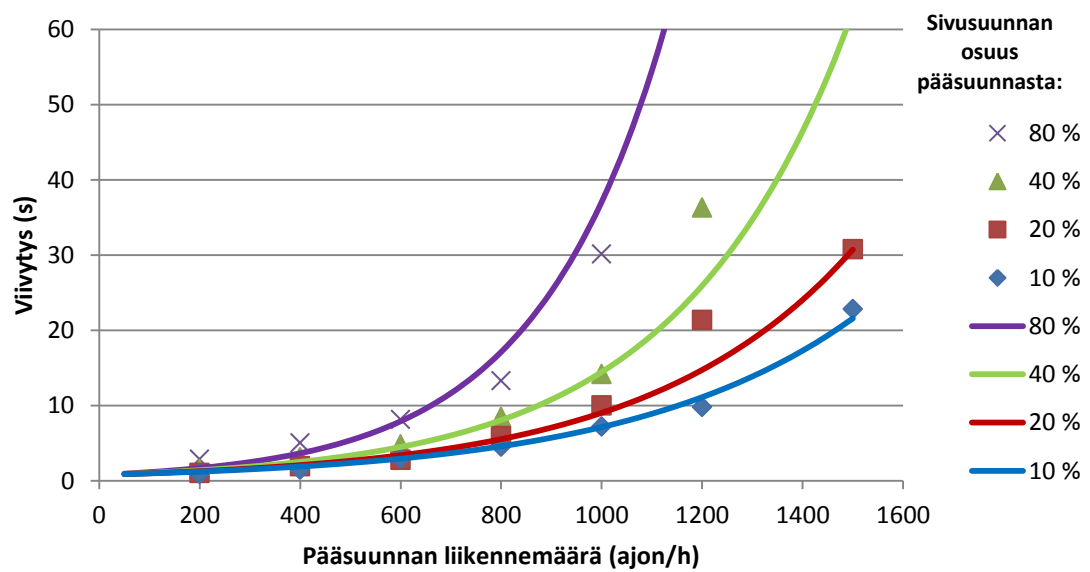
Kanavoimaton 3-haaraliittymä, sivusuunta



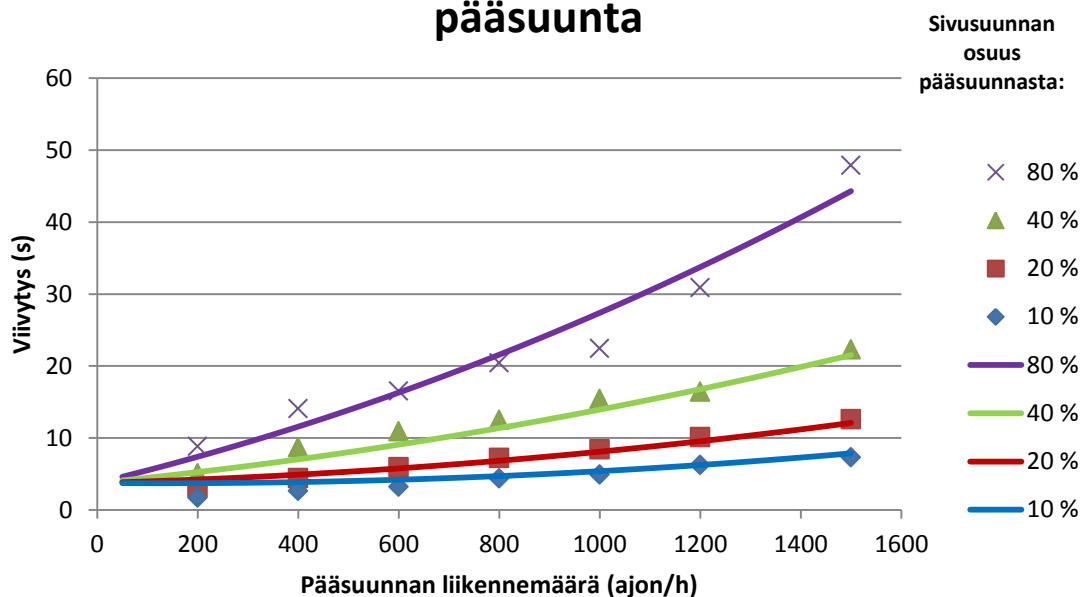
Kanavoitu 3-haaraliittymä, pääsuunta



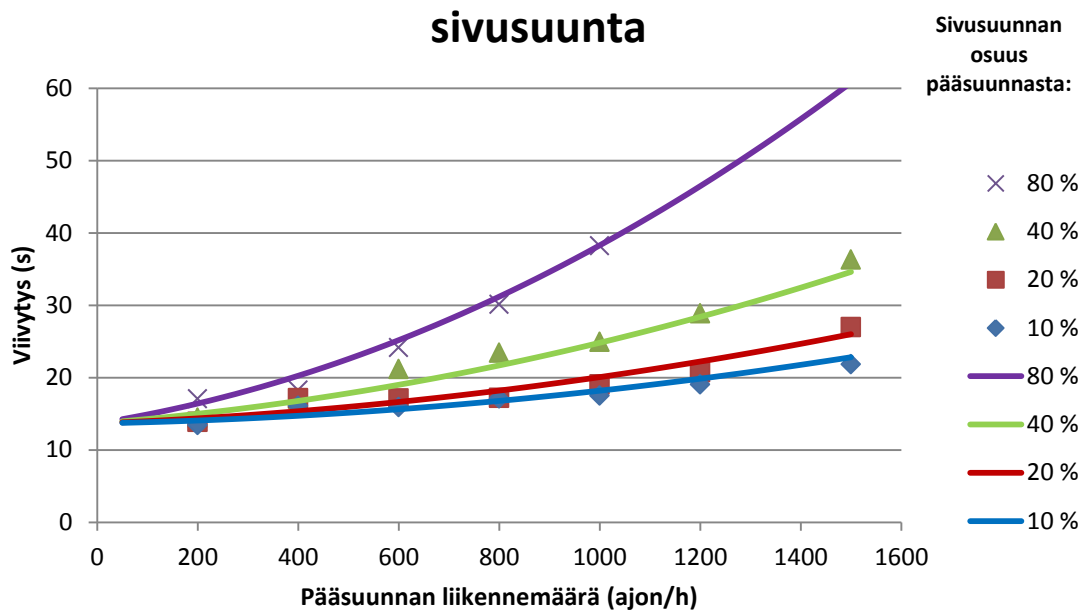
Kanavoitu 3-haaraliittymä, sivusuunta



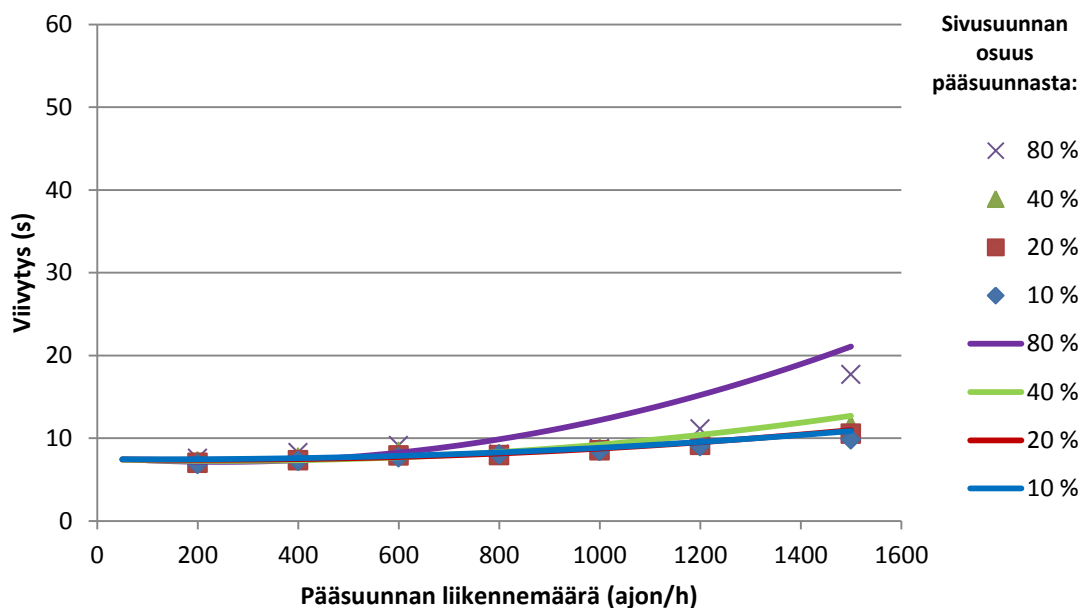
Valo-ohjauksinen 3-haaraliittymä, pääsuunta



Valo-ohjauksinen 3-haaraliittymä, sivusuunta



3-haarainen kiertoliittymä, pääsuunta



3-haarainen kiertoliittymä, sivusuunta

